

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil

ELOISE DE OLIVEIRA

**CONTRIBUIÇÃO PARA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
VISANDO A ENERGIA E O CO₂ EMBUTIDOS NO SISTEMA CONSTRUTIVO WOOD
FRAME**

CURITIBA

2016

ELOISE DE OLIVEIRA

**CONTRIBUIÇÃO PARA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
VISANDO A ENERGIA E O CO₂ EMBUTIDOS NO SISTEMA CONSTRUTIVO WOOD
FRAME**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil, Área de Concentração Ambiente Construído e Gestão, Departamento de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia da Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Sergio F. Tavares

CURITIBA

2016

Oliveira, Eloise de

Contribuição para análise do ciclo de vida no ambiente construído visando a energia e CO₂ embutidos no sistema construtivo wood frame / Eloise de Oliveira. – Curitiba, 2016.

125 f. : il.; tabs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil.

Orientador: Sergio F. Tavares

Bibliografia: p.97-103

1. Análise do ciclo de vida do produto. 2. Análise energética. 3. Estruturas de madeira (Construção civil). I. Tavares, Sergio F. II. Título.

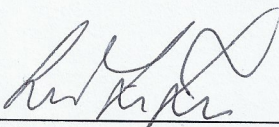
CDD 624.1532

ELOISE DE OLIVEIRA

**CONTRIBUIÇÃO PARA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
VISANDO A ENERGIA E O CO₂ EMBUTIDOS NO SISTEMA CONSTRUTIVO WOOD
FRAME**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Área de Concentração: Ambiente Construído e Gestão, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

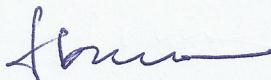
Orientador:



Prof. Dr. Sergio Fernando Tavares

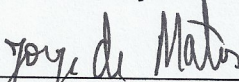
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil – UFPR

Examinadores:



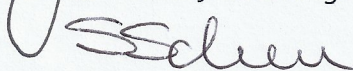
Prof. Dr. George Stanescu

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil – UFPR



Prof. Dr. Jorge Luis Monteiro de Matos

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal – UFPR



Prof. Dr. Sergio Scheer

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil – UFPR

Curitiba, 12 de abril de 2016

Dedico este trabalho à minha família
e a todos que me incentivaram.

Agradeço
aos professores George, Jorge e Sergio;
ao professor orientador Sergio Tavares;

e a todos que contribuíram
para a minha formação como pesquisadora.

*"O desejo profundo da humanidade pelo conhecimento é
justificativa suficiente para a nossa busca contínua."*

Stephen Hawking, 2005

RESUMO

O reconhecimento das alterações climáticas como uma grave ameaça ambiental tem motivando esforços para minimizar as emissões de gases de efeito estufa associados às atividades humanas. Em consequência disso, as preocupações com os impactos ambientais das edificações intensificaram-se, assim como a busca por materiais e sistemas construtivos ambientalmente mais adequados. Com o propósito de avaliar o desempenho ambiental do sistema construtivo *wood frame*, sob a ótica de um parâmetro de sustentabilidade, a dissertação explora a Energia Embutida e o CO₂ Embutido nos materiais de construção em madeira que compõem o sistema. Por meio de revisão bibliográfica determina-se o método de Análise de Ciclo de Vida para a condução das análises energéticas e os conteúdos de energia presentes nos processos industriais dos materiais. Posteriormente, os quantitativos de Energia Embutida e de CO₂ Embutido, nos processos de extração da madeira e fabricação dos materiais, são aplicados em dois padrões construtivos de *wood frame*. Por fim, são estabelecidos cinco cenários de avaliação, fundamentados com dados retirados de estudos anteriores. Verifica-se que há variabilidade de resultados entre os padrões construtivos e os diferentes cenários. Nas análises energéticas dos materiais de construção comprova-se a representatividade do processo de exploração da madeira no quantitativo de Energia Embutida e CO₂Embutido. O cálculo de carbono estocado em produtos de madeira também demonstra ser significativo para as estimativas de CO₂Embutido nos materiais de construção, neutralizando as emissões de CO₂ associadas a um dos padrões de *wood frame*. Percebe-se que a diferença de resultados entre os padrões construtivos é atribuída às composições de materiais dos sistemas; e, em relação aos cenários de avaliação, a variabilidade de dados é a principal motivação para a divergência de resultados. O trabalho contribui para condução de futuras Análises do Ciclo de Vida no ambiente construído e para a avaliação ambiental do sistema construtivo *wood frame* através de um parâmetro de sustentabilidade.

Palavras-chave: Análise do Ciclo de Vida, Análise Energética, Energia Embutida, CO₂ Embutido, *Wood Frame*

ABSTRACT

The recognition of climate change as a serious environmental threat has motivated efforts to minimize greenhouse gases emissions associated to human activities. As a result, the concerns with the environmental impacts of the buildings have been intensified, as well as the search for more environmentally suitable materials and constructive systems. With the purpose of evaluating the environmental performance of wood frame constructive system under the perspective of a parameter of sustainability, this dissertation explores the Embodied Energy and Embodied CO₂ in wooden construction materials of which the system consists. Through a bibliographic review one determines the method of Life Cycle Analysis for the conduct of energy analysis and the energy content present in the industrial processes of materials. Subsequently, the quantitative of Embodied Energy and Embodied CO₂ in the processes of wood extraction and manufacturing of materials, are applied in two constructive patterns of wood frame. Finally five assessment scenarios are established, based on data from previous studies. It was verified that there is variability of results between the constructive patterns and the different scenarios. The energy analysis of construction materials proves the representativeness of the wood extraction process in quantitative of Embodied Energy and Embodied CO₂. The calculation of the amount of carbon stored in wood products also demonstrates to be significant for the estimates of Embodied CO₂ in construction materials. It neutralized the CO₂ emissions associated with one of the patterns of wood frame. It is noticed that the differences in results between the constructive patterns are assigned to compositions of the systems' materials. In relation to assessment scenarios, the variability of data is the main motivation for the divergence in the results. The work contributes to the future implementation/execution of Life Cycle Analysis in the built environment and to the environmental assessment of wood frame constructive system through a parameter of sustainability.

Keywords: Life Cycle Analysis, Energy Analysis, Embodied Energy, CO₂ Emissions, Wood Frame

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIMCI – Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente

ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas

ACV – Análise do Ciclo de Vida

ACVE – Análise do Ciclo de Vida Energético

AWC – *American Wood Council*

BEN – Balanço Energético Nacional

CORRIM – *Consortium for Research on Renewable Industrial Materials*

DATec – Documento de Avaliação Técnica

EE – Energia Embutida

EElétrica – Energia Elétrica

ETérmica – Energia Térmica

GEE – Gases de Efeito Estufa

GWP – *Global Warming Potential*.

ICE – *Inventory of Carbon and Energy*

IEA – *International Energy Agency*

IFIAS – *International Federation of Institutes for Advanced Study*

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*

ISO – *International Organization for Standardization*

ITA – Instituição Técnica Avaliadora

MDF – *Medium Density Fiberboard*

SETAC – *Society of Environmental, Toxicology and Chemistry*

SiNAT – Sistema Nacional de Avaliação Técnica

OSB – *Oriented Strand Board*

PPGECC – Pós-Graduação em Construção Civil

RTE – Requisitos Totais de Energia

UFPR – Universidade Federal do Paraná

MIPD – *Major Industrial Plant Databases*

WFCM – *Wood Frame Construction Manual*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: O ciclo de vida de um produto.....	32
Figura 2: Fluxograma de processos utilizado em ACVs	33
Figura 3: Estrutura de uma ACV	34
Figura 4: Ciclo de vida de uma edificação	35
Figura 5: Etapas do ciclo de vida de uma edificação.....	36
Figura 6: Ciclo do CO ₂ com ênfase na construção civil.....	41
Figura 7: Estrutura da cadeia produtiva da madeira	43
Figura 8: Componentes da habitação em <i>wood frame</i>	44
Figura 9: Pannel OSB	46
Figura 10: <i>Feller- Buncher</i>	48
Figura 11: Forwarder	48
Figura 12: <i>Harvester</i>	49
Figura 13: Limite da exploração da pesquisa.....	65
Figura 14: Fluxo industrial do OSB.....	67
Figura 15: Limites da análise	68
Figura 16: Fluxo energético no processo de exploração da madeira.....	69
Figura 17: Fluxo energético na produção da madeira serrada.....	71
Figura 18: Fluxo energético na produção da <i>fiberboard</i>	74
Figura 19: Composição das paredes internas e externas do padrão A	86
Figura 20: Composição das paredes internas e externas do padrão B	87

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Demanda de energia primária para manufatura dos materiais empregados em 1m ²	24
Gráfico 2: Contribuição de CO ₂ associado ao processo de manufatura dos materiais empregados em 1m ²	25
Gráfico 3: Oferta interna de energia por fonte	39
Gráfico 4: Comparativo de EE entre os cenários	92
Gráfico 5: Comparativo de CO ₂ Embutido entre os cenários	93

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Mapa mental.....	30
Quadro 2: Estrutura da dissertação.....	31
Quadro 3: Sumário dos trabalhos revisados.....	50
Quadro 4: Variabilidade entre os estudos.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fontes de origem da energia no setor industrial para fabricação de materiais de construção civil.....	24
Tabela 2: Percentual de fontes não renováveis por material de construção	40
Tabela 3: Consumo de energia elétrica para a manufatura de produtos - madeira de coníferas	52
Tabela 4: Consumo de energia elétrica e térmica para a manufatura de produtos - madeira de folhosas.....	52
Tabela 5: Consumo de energia elétrica para a manufatura de produtos.....	52
Tabela 6: EE nos materiais por etapa do ciclo de vida - Norte da costa oeste (MJ/m ³).....	53
Tabela 7: EE nos materiais por etapa do ciclo de vida - Sul da costa leste (MJ/m ³)	53
Tabela 8: CO ₂ Embutido nos materiais (kgCO ₂ /kg).....	54
Tabela 9: EE e CO ₂ Embutido nos materiais de construção	54
Tabela 10: Coeficientes de transporte	55
Tabela 11: EE e CO ₂ Embutido nos materiais de construção.....	55
Tabela 12: EE e CO ₂ Embutido nos materiais de construção de madeira (MJ/kg).....	55
Tabela 13: Média dos requisitos energéticos nas operações florestais (MJ/m ³)	56
Tabela 14: Contribuição relativas às operações florestais (%)	57
Tabela 15: CO ₂ Embutido em 1m ³ de OSB	57
Tabela 16: Consumo de energia no processo de manufatura da madeira serrada (MJ/kg) ...	58
Tabela 17: GWP e demanda de energia acumulada nos cenários 1, 6 e 7	59
Tabela 18: Total de Energia Embutida e CO ₂ Embutido nos sistemas construtivos.....	60
Tabela 19: Cálculo de Energia Embutida no processo de exploração da madeira	69
Tabela 20: Requisitos energéticos para a fabricação da madeira serrada e da <i>fiberboard</i>	72
Tabela 21: Cálculo de Energia Embutida no processo industrial da madeira serrada	72
Tabela 22: EE Total na madeira serrada	73
Tabela 23: Cálculo de Energia Embutida na produção de resíduos.....	75
Tabela 24: Cálculo de Energia Embutida no processo industrial da <i>fiberboard</i>	75
Tabela 25: Cálculo de EE Total na <i>fiberboard</i>	75
Tabela 26: Base de dados para estimativa de eletricidade	76
Tabela 27: Geração de CO ₂ por tipo de fonte energética	76

Tabela 28: Emissões de CO ₂ para a EE elétrica no processo de exploração da madeira	77
Tabela 29: Emissões de CO ₂ para a ETérmica no processo de exploração da madeira	77
Tabela 30: CO ₂ Embutido total no processo de exploração da madeira	78
Tabela 31: Emissões de CO ₂ para a EE elétrica no processo industrial da madeira serrada	78
Tabela 32: Emissões de CO ₂ para a ETérmica no processo industrial da madeira serrada ...	78
Tabela 33: CO ₂ Embutido total no processo industrial da madeira serrada	79
Tabela 34: Emissões de CO ₂ no processo industrial da madeira serrada incluindo os processos de exploração da madeira	79
Tabela 35: Emissões de CO ₂ para a EE elétrica na produção de resíduos	79
Tabela 36: Emissões de CO ₂ para a EE elétrica no processo industrial da <i>fiberboard</i>	79
Tabela 37: Emissões de CO ₂ para a ETérmica no processo industrial da <i>fiberboard</i>	80
Tabela 38: CO ₂ Embutido total no processo industrial da <i>fiberboard</i>	80
Tabela 39: Emissões de CO ₂ no processo industrial da <i>fiberboard</i> incluindo os processos de exploração da madeira e produção de resíduos	81
Tabela 40: Cálculo de carbono estocado	81
Tabela 41: Variabilidade de EE entre os estudos	84
Tabela 42: Variabilidade de CO ₂ Embutido entre os estudos	84
Tabela 43: Quantitativo de material padrão A	86
Tabela 44: Quantitativo de material padrão B	87
Tabela 45: Dados do cenário 1 para o cálculo de EE e CO ₂ Embutido nos Padrões A e B	88
Tabela 46: EE e CO ₂ Embutido nos padrões A e B no cenário 1	88
Tabela 47: Dados do cenário 2 para o cálculo de EE e CO ₂ Embutido nos Padrões A e B	89
Tabela 48: EE e CO ₂ Embutido nos padrões A e B no cenário 2	89
Tabela 49: Dados do cenário 3 para o cálculo de EE e CO ₂ Embutido nos Padrões A e B	89
Tabela 50: EE e CO ₂ Embutido nos padrões A e B no cenário 3	90
Tabela 51: EE e CO ₂ Embutido nos materiais por etapa do ciclo de vida	90
Tabela 52: EE e CO ₂ Embutido nos padrões A e B no cenário 4	91
Tabela 53: EE e CO ₂ Embutido nos padrões A e B no cenário 5	91

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
1.1. PROBLEMA	22
1.2. PRESSUPOSTOS	22
1.3. OBJETIVO	22
1.4. JUSTIFICATIVA	22
1.5. CONTEXTUALIZAÇÃO NO PROGRAMA	27
1.6. ESTRATÉGIA DE PESQUISA	28
1.7. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	30
2. REVISÃO DE LITERATURA	32
2.1. ANÁLISE DO CICLO DE VIDA	32
2.1.1. Conceito de ACV	32
2.1.2. Estrutura da ACV	34
2.1.3. Pontos de incerteza na ACV	35
2.1.4. ACV em edificações	35
2.2. ANÁLISE DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO	36
2.2.1. Conceito de EE	37
2.2.2. Método de análise de EE	37
2.2.3. Análise energética em edificações	38
2.3. DIÓXIDO DE CARBONO	38
2.3.1. Método de análise de emissões de dióxido de carbono	39
2.3.2. Carbono estocado	40
2.3.3. Carbono estocado em edificações	42
2.4. WOOD FRAME	42
2.4.1. Tecnologia	42
2.4.2. Materiais	46
2.4.3. Operações florestais	47
2.5. CONCLUSÃO DA REVISÃO DE LITERATURA	49
3. ESTADO DA ARTE: EE E CO ₂ EMBUTIDO EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	50
3.1. ANÁLISE DE ESTUDOS EXISTENTES	50
3.1.1. Brown, Hamel e Hedman (1996)	51

3.1.2.	Brand (2000)	51
3.1.3.	Puettmann e Wilson (2005).....	53
3.1.4.	Alcorn (2010).....	54
3.1.5.	Bribián et al. (2011).....	54
3.1.6.	Hammond e Jones (2011)	55
3.1.7.	May et al. (2012)	56
3.1.8.	Puettmann et al. (2013)	57
3.1.9.	Souza (2013).....	58
3.1.10.	Murphy, Devlin e McDonnell (2015)	58
3.1.11.	Oliveira et al. (2015)	59
3.2.	VARIABILIDADE ENTRE OS ESTUDOS	60
3.3.	CONCLUSÃO DO ESTADO DA ARTE	63
4.	EE E CO ₂ EMBUTIDO NOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	64
4.1.	OBJETIVO E ESCOPO.....	64
4.2.	ANÁLISE DO INVENTÁRIO	66
4.2.1.	Exploração da madeira.....	68
4.2.2.	Madeira serrada.....	70
4.2.3.	<i>Fiberboard</i>	73
4.3.	AVALIAÇÃO DE IMPACTO	76
4.3.1.	Exploração da madeira.....	77
4.3.2.	Madeira serrada.....	78
4.3.3.	<i>Fiberboard</i>	79
4.4.	CO ₂ ESTOCADO NOS PRODUTOS DE MADEIRA	81
4.5.	INTERPRETAÇÃO	81
4.6.	VARIABILIDADE.....	83
5.	EE E CO ₂ EMBUTIDO NO SISTEMA <i>WOOD FRAME</i>	85
5.1.	PADRÃO A	85
5.2.	PADRÃO B	86
5.3.	CENÁRIO 1	88
5.4.	CENÁRIO 2.....	88
5.5.	CENÁRIO 3	89
5.6.	CENÁRIO 4.....	90

5.7. CENÁRIO 5	91
5.8. ANÁLISE CRÍTICA.....	92
6. CONCLUSÕES	95
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
APÊNDICE	104
ANEXO	110

1. INTRODUÇÃO

Os materiais de construção civil representam uma importante linha de pesquisa no contexto da sustentabilidade no ambiente construído. A nível mundial, as atividades da construção civil consomem 60% da matéria-prima extraída da litosfera (BRIBIÁN, CAPILLA e USÓN, 2011). A manufatura de materiais de construção envolvem grandes quantidades de energia e geram impactos ambientais significativos.

Nos últimos anos, o desejo de quantificar o impacto ambiental das atividades humanas tem aumentado cada vez mais, a fim de ajudar a mitigar as mudanças climáticas (TAKANO et al., 2014). Neste sentido, os estudos de impactos ambientais tornaram-se uma tendência nos mais variados setores econômicos. O método de Análise do Ciclo de Vida - ACV tem sido amplamente utilizado para avaliar os impactos ambientais gerados por produtos e serviços durante todo o seu ciclo de vida.

No setor da construção civil a ACV é aplicada às edificações e refere-se a todas as fases temporais ou etapas, desde o ponto onde os materiais de construção são processados até a desconstrução da edificação (ADALBERTH, 1997). O método de ACV é uma ferramenta que fornece suporte necessário para decisões estratégicas e elaboração de alternativas que melhoram o desempenho ambiental da edificação. As decisões tomadas durante as etapas iniciais do projeto do edifício podem determinar criticamente o seu impacto ambiental (BASBAGILL et al., 2013).

A maior parte dos estudos de ACV em edificações estão concentrados no ciclo de vida completo e sugerem que a fase de operação domina as emissões de CO₂, porém estudos recentes inspiram mais ênfase no CO₂ Embutido nos materiais de construção (HEINONEN et al., 2016). As emissões de CO₂ são o foco da maioria dos estudos de ACV em edificações devido à sua correlação com as demais categorias de impactos ambientais.

Com a crescente conscientização da necessidade de melhorar o desempenho ambiental dos materiais de construção, produtos que utilizam matéria-prima orgânica como a madeira têm sido vistos com um método prático de mitigar as emissões de CO₂ no ambiente construído. A capacidade das florestas para sequestrar carbono atua como uma fonte renovável de materiais e energia (MAY et al., 2012). Os benefícios ambientais da madeira estão sendo o centro dos estudos de ACV na indústria florestal.

No âmbito das ACVs em edificações, os edifícios com estruturas de madeira apresentam balanços energéticos e emissões de CO₂ mais baixas que os edifícios com

estrutura em concreto (GUSTAVSON e SATHRE, 2006). O sistema *wood frame* é um exemplo de padrão construtivo que incorpora um alto volume de materiais de construção à base de madeira. O atual movimento de construções sustentáveis retomou o interesse em maximizar o uso de produtos de madeira em edificações e intensificou as pesquisas sobre sistemas construtivos como o *wood frame*.

Entre os produtos de madeira utilizados no *wood frame* está a madeira serrada e o painel estrutural *Oriented Strand Board* – OSB. A energia requisitada para a manufatura dos produtos de madeira é significativamente menor, se comparada aos demais produtos, no entanto produtos que necessitam de colagem e aquecimento têm requisitos energéticos mais elevados do que a madeira serrada (SEDJO, 2001).

As emissões de CO₂ associadas à fabricação do OSB estão localizadas nos processos de secagem e prensagem dos painéis. O consumo energético a partir de combustíveis fósseis não renováveis representa 49% de todo o CO₂ emitido durante os processos de plantio, manejo florestal, exploração da madeira e manufatura de produtos (PUETTMANN et al., 2013). Em contrapartida, ainda segundo Puettmann et al. (2013), o estoque de carbono no painel OSB é quatro vezes maior que as emissões de CO₂ associadas à sua produção.

Embora se reconheça que a madeira oferece grande potencial para gerar benefícios em relação às emissões de CO₂, recomenda-se intensificar as investigações a respeito dos processos industriais envolvidos na exploração da madeira e na manufatura de produtos. Além disso, acredita-se na importância de investigar os benefícios do uso da madeira no ambiente construído e demonstrar os impactos ambientais associados ao *wood frame*.

Assim, o presente trabalho busca determinar quantitativamente a Energia Embutida – EE e o CO₂ Embutido nos materiais de construção do sistema *wood frame*. A investigação numérica e metodológica dos dados de estudos anteriores também é o foco desta pesquisa. Além de determinar os requisitos energéticos e as emissões de dióxido de carbono nos materiais do *wood frame*, faz-se necessário a determinação da EE e CO₂ Embutido na composição de dois padrões construtivos do sistema; em cinco cenários distintos.

Neste sentido, as investigações serão conduzidas a partir do fluxograma industrial dos seguintes processos: exploração da madeira, manufatura da madeira serrada e fabricação da *fiberboard*. A análise de resultados será desenvolvida através de um comparativo com estudos anteriores. Estima-se que os dados obtidos através desta pesquisa auxiliem na condução de futuras ACVs no ambiente construído.

1.1. PROBLEMA

A presente dissertação trata da EE e do CO₂ Embutido no sistema construtivo *wood frame*. A questão que mostra-se fundamental para esta exploração é:

- Quais são os impactos ambientais, em termos de EE e CO₂ Embutido, associados ao processo de fabricação dos materiais de construção do sistema *wood frame*?

1.2. PRESSUPOSTOS

Três pressupostos fundamentam esta pesquisa:

O primeiro deles é que os materiais de construção de madeira apresentam importante impacto ambiental associado ao processo de exploração florestal (BOYD et al., 1977).

O segundo é que o carbono estocado em produtos de madeira contribui positivamente no quantitativo de CO₂ Embutido nos materiais de construção (SEDJO, 2001).

O terceiro pressuposto é que existe variabilidade entre dados de EE e CO₂ Embutido e diferentes padrões construtivos do sistema *wood frame* (TAKANO et al., 2014).

1.3. OBJETIVO

Tem-se como objetivo geral desta dissertação determinar quantitativamente a EE e o CO₂ Embutido na extração e produção dos materiais de construção de madeira que compõe o sistema construtivo *wood frame*.

De modo específico, pretende-se estimar a Energia Térmica – ETérmica e a Energia Elétrica – EElétrica requisitada para a extração da madeira e produção dos materiais de construção; determinar as Emissão de CO₂ associadas aos processos industriais de fabricação dos materiais de construção; comparar dois padrões construtivos do sistema *wood frame* através dos resultados de EE e CO₂ Embutido nos materiais de construção.

1.4. JUSTIFICATIVA

Em 2015, durante a última Conferência das Nações Unidas sobre Mudança Climática, em Paris, foi reconhecido que as alterações climáticas representam uma ameaça urgente e potencialmente irreversível para a sociedade humana e para o planeta e, portanto, requer a mais ampla cooperação e participação de todos os países em uma resposta internacional eficaz e apropriada, com vista a acelerar a redução global das emissões de gases de efeito estufa (UN, 2015). O documento estabelece como objetivo reduzir, até 2020, as emissões anuais globais de gases de efeito estufa e limitar o aumento da temperatura média global

em 1,5°C. A principal meta estabelecida durante a conferência é chegar no ano de 2100 com emissões zero, ou seja, todos os gases de efeito estufa emitidos pelas atividades humanas serão compensados. Este seria o início de uma economia neutra em carbono, denominada “descarbonização”.

Neste sentido, é possível prever o aumento das pesquisas científicas focadas em minimizar as emissões de gases de efeito estufa associadas às atividades humanas. Nas décadas passadas houve um grande despertar ambiental e as pesquisas estavam orientadas à busca dos causadores dos danos ambientais. Passada esta etapa de reconhecimento dos impactos ambientais e seus agentes causadores, o atual foco das pesquisas científicas está na investigação e implementação de medidas eficazes em reduzir e compensar as emissões.

No campo da construção civil, estudos demonstram os impactos ambientais inerentes ao processo de edificação do ambiente construído. Na Inglaterra, o setor da construção civil contribui com 50% das emissões total de CO₂ e consome 40% da produção energética do país (WANG, TOPPINEN e JUSLIN, 2014). No Brasil, o setor representa 44% do consumo total de energia e 75% dos recursos naturais (PAULSEN e SPOSTO, 2013).

Parte das emissões de CO₂ provenientes da construção civil estão vinculadas ao processo de fabricação dos materiais e ao transporte destes até o canteiro de obras. A alta demanda energética requisitada para a produção dos materiais de construção contribui com emissões de gases de efeito estufa devido ao processo de geração de energia a partir de fontes energéticas não renováveis.

Em 2014, o total de emissões associadas à matriz energética brasileira atingiu 485,2 Mt CO₂-eq, sendo que o setor industrial contribui com 18,5% das emissões totais (BRASIL, 2015). Observa-se contribuições significativas de emissão de CO₂ no setor industrial oriundas da fabricação de três dos principais insumos da construção civil; o cimento, a cal e o alumínio.

A emissão de CO₂ embutida na fabricação dos materiais de construção está ligada à alta demanda energética e à origem e o tipo de energia utilizada nos processos industriais. Os requisitos energéticos podem ser de origem renovável ou não renovável. Através da Tabela 1 é possível observar as fontes energéticas no setor industrial para a fabricação de materiais de construção.

Tabela 1: Fontes de origem da energia no setor industrial para fabricação de materiais de construção civil

Setor Industrial	Fontes Fósseis*	Fontes Renováveis**
Cimento	84,6	15,4
Ferro-gusa e aço	67,36	32,74
Ferroligas	26,6	73,5
Mineração e pelletização	76,88	23,12
Não ferrosos e outros metálicos	54,96	45,04
Cerâmica	43,14	56,76
Outras indústrias	48,64	51,36

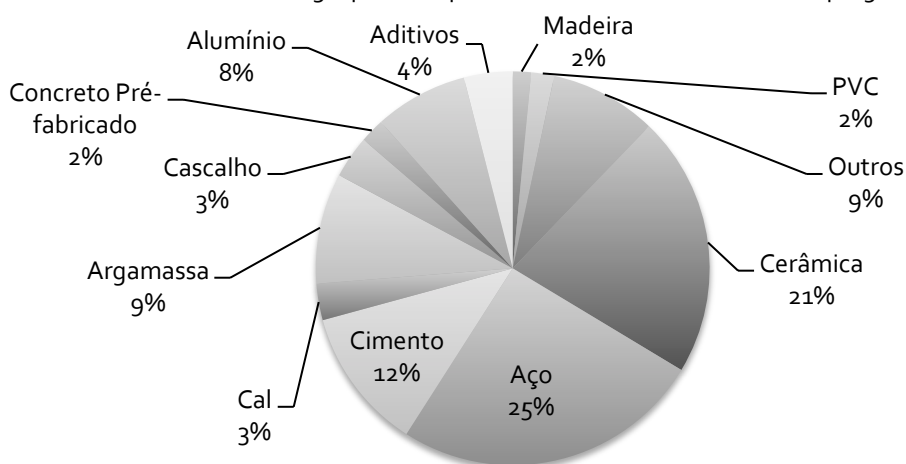
* Fontes de origem fóssil consideradas: carvão mineral, óleo combustível, eletricidade oriunda de usinas térmicas e nucleares (20%), coque de petróleo, gás natural e outras.

** Fontes de origem renovável consideradas: eletricidade oriunda de usinas hidroelétricas (80%), carvão vegetal.

Fonte: GRAF (2010)

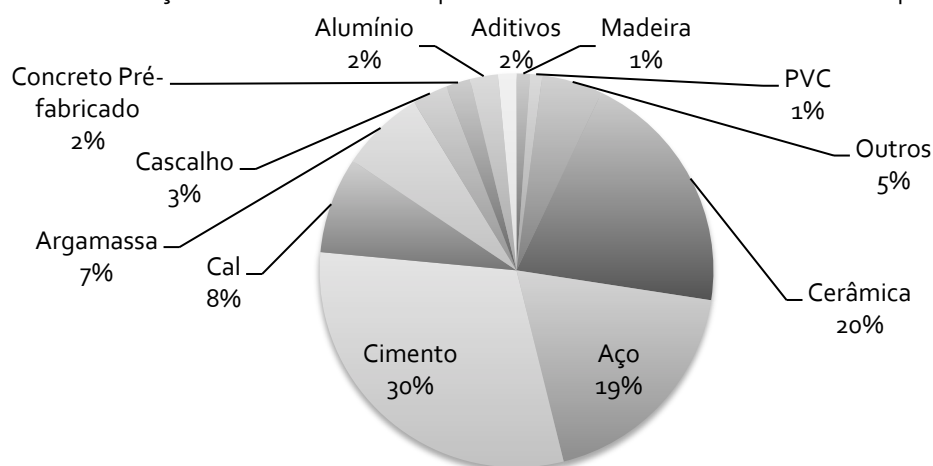
Os impactos ambientais associados aos materiais de construção também são provenientes de processos industriais com alta emissão de gases geradores do efeito estufa. Na produção de cimento, a emissão de gases poluentes, está ligada à calcinação do calcário e à queima de eletrodos de origem fóssil. Através dos Gráficos 1 e 2 ilustra-se a EE nos principais materiais de construção e as emissões de CO₂ associada à 1m² construído.

Gráfico 1: Demanda de energia primária para manufatura dos materiais empregados em 1m²



Fonte: Adaptado de BRIBIÁN; CAPILLA; USÓN (2011)

Gráfico 2: Contribuição de CO₂ associado ao processo de manufatura dos materiais empregados em 1m²



Fonte: Adaptado de BRIBIÁN; CAPILLA; USÓN (2011)

Quantificar as emissões de gases de efeito estufa é uma das formas de avaliar os impactos ambientais de produtos e serviços. Sabe-se que os materiais de construção podem associar outros impactos ambientais igualmente importantes, como: toxicidade humana, acidificação, eutrofização e demanda de energia acumulada (KUA e KAMATH, 2014).

Nesta perspectiva, a madeira é um recurso renovável e "ambientalmente amigável", se comparada a outros materiais (LIPPKE et al., 2004). Os sistemas biológicos desempenham um papel notável na diminuição do acúmulo de dióxido de carbono atmosférico. O processo de crescimento da floresta permite a captura de carbono nas células da árvore e o mantém estocado na madeira. Em 2009, a cobertura florestal brasileira ofereceu 62,6 milhões de toneladas de CO₂ armazenado (BRASIL, 2010).

O potencial madeireiro nacional também contribui de forma convergente no incentivo ao uso de produtos de madeira no setor da construção civil. No Brasil, em 2009, a área de florestas plantadas somaram 7,2 milhões de hectares, destes, foram explorados 139,9 milhões de m³ de madeira em tora, direcionadas apenas para a indústria, e 4,9 milhões de m³ de madeira serrada (BRASIL, 2014).

No entanto, a simples utilização da madeira não garante edificações com menores impactos ambientais (MONICH, 2012). Deve-se considerar a origem da madeira, o plano de manejo, o processo de exploração da floresta, o transporte e a manufatura do produto final.

O aproveitamento de madeira oriunda de florestas plantadas somado à adoção de sistemas construtivos industrializado podem reduzir os impactos ambientais das edificações.

Atualmente às pesquisas voltadas à técnicas construtivas inovadoras concentram-se em soluções racionalizadas, as quais incorporam na produção das edificações os conceitos de sustentabilidade, desempenho, produtividade e flexibilidade, para resultar em um produto eficiente, com qualidade e baixo custo (ESPÍNDOLA, 2010). Entre os sistemas construtivos inovadores, o *wood frame* constitui uma opção viável para a prática construtiva no Brasil.

No sistema construtivo *wood frame* utiliza-se como principal insumo a madeira de reflorestamento, que além de contribuir para a sustentabilidade ambiental, incentiva o desenvolvimento de florestas plantadas. O *wood frame* ainda é pouco difundido no Brasil, no entanto pode ser adaptado adequadamente às condições brasileiras, contribuindo para o desenvolvimento tecnológico e a geração de recursos financeiros nos setores industrial, florestal e da construção civil.

No Brasil, existe um alto potencial para a utilização do sistema *wood frame*, uma vez que as extensas áreas de florestas plantadas minimizam os custos e os impactos ambientais decorrentes do transporte da madeira. Este é um dos problemas enfrentado pela maioria dos países que utilizam o *wood frame* como sistema construtivo convencional.

Entre as vantagens do sistema *wood frame*, destaca-se a facilidade de manutenção da edificação, já que o sistema pode sofrer intervenções acessíveis e de baixo custo. A habitação em madeira é 70% mais leve se comparada à alvenaria em tijolos, possibilitando soluções de fundação mais econômicas (MONICH, 2012). O *wood frame* ainda pode oferecer técnicas de isolamento térmico e acústico, elevando a qualidade do ambiente e reduzindo o consumo energético para climatização da edificação.

Portanto, esta pesquisa se justifica nas contribuições ambientais, sociais, tecnológicas e econômicas. Ambientais, por investigar o consumo energético e a geração de gás carbônico associadas à fabricação dos materiais de construção, além de avaliar o sistema construtivo *wood frame* sob a ótica da sustentabilidade. Sociais, por colaborar para a preservação de recursos naturais para as gerações futuras; e explorar uma técnica construtiva alternativa para suprir o déficit de habitações no Brasil. Tecnológica, por descrever métodos e gerar dados para a condução de futuras ACVs em edificações e no ambiente construído. E

econômica, por investigar os processo de manufatura da madeira e recomendar a utilização de materiais de construção de madeira no setor da construção civil.

1.5. CONTEXTUALIZAÇÃO NO PROGRAMA

Neste item estão relacionadas as dissertações do Programa de Pós-Graduação em Construção Civil – PPGECC da Universidade Federal Do Paraná – UFPR que apresentam linhas de pesquisa convergentes com a presente dissertação.

Druszcz (2002) identifica os fatores de maior relevância no que diz respeito à avaliação dos aspectos ambientais de diferentes materiais de construção civil. Utilizou o método de ACV para identificar as etapas do ciclo de vida do bloco cerâmico que causam maiores impactos ao meio ambiente.

Hilgenberg Neto (2003) analisa a viabilidade técnica e econômica da adoção do sistema construtivo *Light Wood Frame* como alternativa ao processo construtivo convencional, em alvenaria de tijolos e estrutura de concreto armado, para construção de habitações populares no Brasil. Determina os parâmetros estruturais mínimos e o custo básico para a construção da habitação em madeira.

Castro (2008) definiu as diretrizes com o objetivo de promover novas considerações ao uso da madeira em edificações residenciais. Fundamentado pela realidade chilena, apontou formas de aplicabilidade no cenário nacional.

Ayres (2009) investigou diferentes formas de acessar o modelo integrado do edifício e extrair dados para a geração de novas informações. Destaca-se a inserção de dados de EE e CO₂ Embutido na biblioteca de materiais de construção de um *software* BIM.

Lobo (2010) desenvolve uma ferramenta de inventário de EE e emissão equivalente de dióxido de carbono através de uma planilha de composição de serviços de obra. Utiliza a abordagem por ACV para aumentar o desempenho ambiental de produtos, processos e serviços do setor da construção civil.

Graf (2011) explora a relação entre a eficiência térmica e energética na arquitetura. Determina as condições de equilíbrio entre a transmitância térmica e a EE no envelope de uma edificação brasileira padrão para a cidade e o clima de Curitiba.

Monich (2012) dimensiona a energia e o carbono embutido nos materiais que compõem uma habitação de interesse social pré-fabricada em madeira. Determina o impacto

ambiental da edificação, em termos de EE, através de uma análise do processo de manufatura da habitação.

Oba (2014) explora a prática da readequação do patrimônio arquitetônico moderno através de uma abordagem relacionada à eficiência energética e ao conforto térmico e lumínico. Utiliza o método de ACV em um edifício modernista, em Curitiba, para quantificar o consumo energético relacionados a construção, manutenção e operação da edificação.

Marchesini (2013) descreve a EE no mobiliário em *Medium Density Fiberboard* – MDF utilizando um método híbrido com dados calculados e dados obtidos através da revisão bibliográfica. Posteriormente realiza uma Análise do Ciclo de Vida Energético - ACVE de uma edificação comercial para avaliar a influência dos móveis na EE total do edifício.

É possível afirmar que a exploração dos impactos ambientais associados às edificações através do método de ACV é um tema amplamente abordado dentro do PPGECC. No entanto, a exploração dos conteúdos energéticos (EElétrica e ETérmica) presentes nos processo de manufatura da madeira e a determinação do carbono embutido em materiais de construção de madeira e no sistema construtivo *wood frame* confere a este trabalho uma parcela de originalidade dentro do programa.

1.6. ESTRATÉGIA DE PESQUISA

Investiga-se, neste trabalho, a EE e o CO₂ Embutido nos materiais de construção que compõem o sistema construtivo *wood frame*. É uma pesquisa voltada à aquisição de conhecimentos com vistas à aplicação numa situação específica (GIL, 2010). Segundo seu objetivo esta pesquisa é classificada como exploratória e assim, como sugerido por Yin (2001), adota-se o levantamento de dados como estratégia.

A pesquisa inicia-se com o levantamento dos insumos energéticos requisitados para a fabricação dos materiais de construção utilizados no sistema construtivo *wood frame*. A partir do levantamento de dados de EE e de CO₂ Embutido nos materiais de construção é possível desenvolver um comparativo entre os resultados obtidos e estudos anteriores e, estabelecer diferentes cenários de avaliação do sistema. A literatura sobre ACV fundamenta o método de determinação de EE e CO₂ Embutido nos materiais de construção, enquanto a bibliografia sobre o sistema *wood frame* determina os padrões construtivos para a análise. A estrutura da dissertação é apresentada no tópico 1.7.

Para a determinação da EE nos materiais foram selecionados três processos industriais do relatório *Energy Analysis of 108 Industrial Process* de Brown, Hamel e Hedman (1996); campos de exploração da madeira, madeira serrada e *fiberboard*. Como unidade de análise utiliza-se as entradas energia elétrica e térmica nos sistemas de produção dos materiais de construção. A correlação entre os sistemas de produção dos materiais é estabelecida com base nas entradas de matéria-prima e geração de resíduos.

Para quantificar o CO₂ Embutido nos produtos de madeira considera-se as emissões de gás carbônico oriundas da geração de EE elétrica e ETérmica. Estima-se o fator de emissão de CO₂ a partir do método de Tavares (2006) com os dados do BEN (2015) e do IPCC (2006). A emissões de CO₂ associadas à reações químicas do processo de fabricação dos produtos não são quantificadas. Para garantir a validade do constructo, os materiais previamente considerados que não possuem dados de processo provenientes de fontes indexadas foram descartados da pesquisa e substituídos por materiais semelhantes. Estudos anteriores que não demonstram clareza em relação ao método e aos limites da análise foram, da mesma forma, desconsiderados desta pesquisa.

A pesquisa limita-se a quantificar a EE e o CO₂ Embutido nos processos industriais dos materiais, com vistas à aplicação dos resultados em estudos futuros de ACV em edificações. A determinação da EE do CO₂ Embutido nos padrões construtivos do sistema *wood frame* tem como propósito avaliar os impactos ambientais do sistema, no tocante às emissões de gás carbônico.

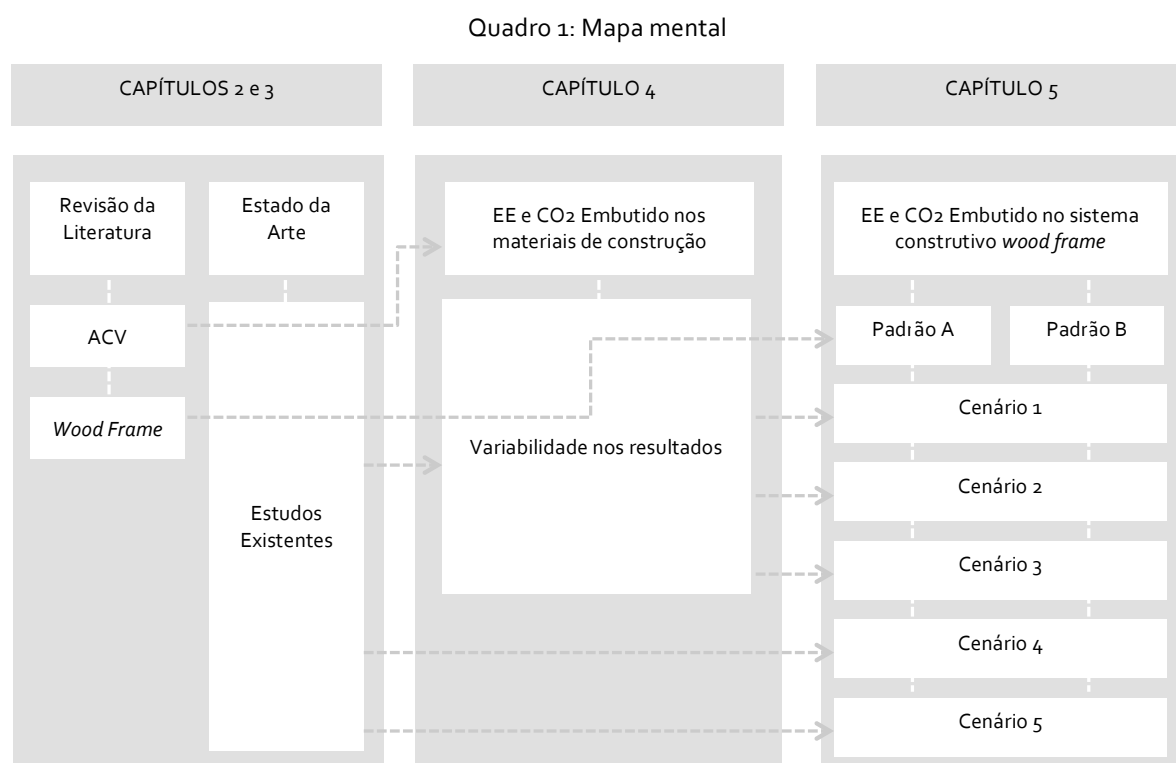
A variabilidade de resultados para um mesmo padrão construtivo é investigada através da determinação de cinco cenários distintos de avaliação. Os três primeiros demonstram a variabilidade de aplicação dos dados obtidos nesta pesquisa, nos últimos dois cenários são incorporados os dados de estudos anteriores. A determinação dos cenários é fundamentada pela análise da variabilidade de dados.

Neste trabalho, considera-se as operações florestais e os processos industriais para estimativas de EE e CO₂ Embutido nos produtos de madeira. A mesma fonte de dados é utilizada para quantificar a EE e o CO₂ Embutido em outros oito materiais de construção, conforme apresentado no Apêndice A. As análises destes materiais de construção estão restritas aos limites da fábrica, uma abordagem *gate-to-gate*, e tem como objetivo validar o método utilizado para quantificar a EE e o CO₂ Embutido na madeira serrada e *fiberboard*.

Considera-se fora dos limites desta pesquisa o aprofundamento da análise dos processos industriais dos materiais, bem como demais impactos ambientais associados. Sabe-se que o aprofundamento das características biológicas da madeira poderia conferir mais precisão às análises. No entanto, esta abordagem, apesar de significativa, poderia alterar o foco central da pesquisa; o ambiente construído.

1.7. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Conforme o mapa mental (Quadro 1) a dissertação está estruturada em três partes distintas e, complementares entre si. A primeira compreende aos Capítulos 2 e 3, enquanto a segunda e a terceira aos Capítulos 4 e 5, respectivamente.



A primeira parte do trabalho inclui a revisão de literatura e o estado da arte, os quais têm como propósito fundamentar o método de investigação, determinar os padrões construtivos, investigar a variabilidade de resultados e estabelecer os cenários de avaliação. Os resultados obtidos no Capítulo 4, onde determina-se a EE e o CO₂ Embutido nos materiais de construção, são utilizados para a avaliação dos padrões construtivos do sistema *wood frame*. Através do Quadro 2 ilustra-se os objetivos, o método e os resultados esperados em cada um dos capítulos.

Quadro 2: Estrutura da dissertação

	Objetivo	Método	Resultado esperado
Capítulo 2	ACV	Fundamentar o método de pesquisa Gerar dados para futuras ACVs	Revisão bibliográfica (ISO 14040, 1997)
	ACVE	Fundamentar o método de análise energética	Revisão bibliográfica (TAVARES, 2006)
	Dióxido de carbono	Fundamentar o método de avaliação de impacto ambiental Método de balanço de carbono	Revisão bibliográfica (TAVARES, 2006)
	Wood frame	Apontar os padrões construtivos de <i>wood frame</i>	Revisão bibliográfica (DATec nº 020, 2013)
Capítulo 3	Estado da arte	Fornecer os fluxogramas indústrias e insumos energéticos Determinar os padrões construtivos de <i>wood frame</i> e os cenários de avaliação Fornecer parâmetros de comparabilidade de dados	Determinação dos fluxogramas industriais e das entradas e saídas de energia Definição dos padrões de <i>wood frame</i> e dos cenários de avaliação Fundamentação da análise da variabilidade entre bases de dados Investigação da variabilidade de resultados
Capítulo 4	Análise energética	Determinar a EE na madeira serrada e na <i>fiberboard</i>	Análise energética (BROWN, HAMEL e HEDMAN, 1996)
	Avaliação de impacto	Determinar o CO ₂ Embutido na madeira serrada e na <i>fiberboard</i>	Método de avaliação de impacto ambiental (IPCC, 2006; TAVARES, 2006; BEN, 2015)
	CO ₂	Calcular o estoque de carbono	Balanco de carbono (OLIVER et al., 2014)
	Estocado		Confirmação do pressuposto que o carbono estocado em produtos de madeira contribui positivamente no quantitativo de CO ₂ Embutido nos materiais de construção (SEDJO, 2001).
Capítulo 5	Padrões A e B	Avaliar diferentes composições de matérias para uma mesma técnica construtiva	Levantamento de dados (HAMMOND e JONES, 2011; ESPINDOLA, 2010; SOUZA, 2013; OLIVEIRA et al, 2015)
	Cenários	Explorar os pontos de incerteza	Análise comparativa (PUETTMMANN e WILSON, 2005; HAMMOND e JONES, 2011; MAY et al., 2012)

2. REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura está dividida em quatro seções; ACV, ACVE, dióxido de carbono e *wood frame*. O objetivo deste capítulo é fundamentar o método de determinação de EE e CO₂ Embutido nos materiais de construção e estabelecer os padrões do sistema construtivo *wood frame* a serem avaliados.

2.1. ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

Com o intuito de auxiliar o entendimento do método, são apresentados, brevemente, os conceitos nos quais este estudo está fundamentado.

2.1.1. Conceito de ACV

Os primeiros estudos que deram origem ao método de ACV tiveram início durante a primeira crise do petróleo, na década de 1970. A crise motivou esforços em busca de alternativas para reduzir o consumo energético e otimizar o uso de recursos naturais. Inicialmente o único objetivo das ACVs era avaliar processos produtivos e racionalizar o uso da energia. Atualmente, os estudos de ACV buscam identificar e quantificar os impactos ambientais visando ainda a geração de parâmetros para compará-los entre bens e serviços similares (TAVARES, 2006).

Segundo a ISO – *International Organization for Standardization* e a norma ISO14040 (1997), a ACV pode ser definida como: “compilação e avaliação das entradas e saídas e impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida.” Na Figura 1 é ilustrado o ciclo de vida de um produto.

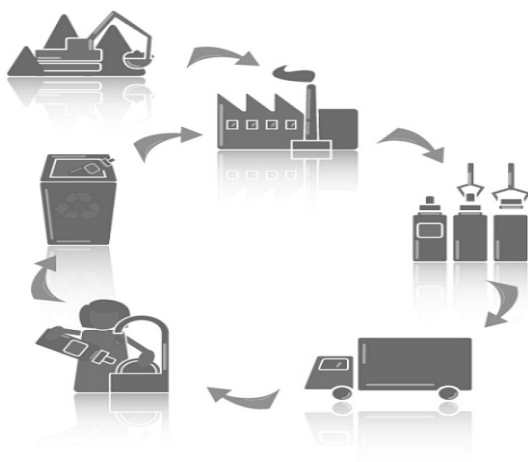


Figura 1: O ciclo de vida de um produto
Fonte: Adaptado de EU Ecolabel (2015)

Um estudo de ACV pode adotar três abordagens distintas do ciclo de vida de um produto: *cradle-to-gate*, *cradle-to-grave* e *cradle-to-cradle*. A primeira delas compreende o processo de extração da matéria-prima e manufatura do produto, a segunda inclui a vida útil do produto e a terceira considera o processo de reciclagem. As análises que se limitam a avaliar apenas o processo industrial do produto são classificadas como *gate-to-gate*.

As ACVs são aplicáveis a qualquer produto ou serviço, desde que as fronteiras da análise sejam claramente delimitadas. A ACV pode ajudar a identificar os impactos ambientais de um sistema de produção e ainda estabelecer um comparativo entre dois ou mais produtos ou diferentes alternativas para um mesmo produto. Esta é uma ferramenta que encoraja a indústria a considerar as questões ambientais associadas aos sistemas de fabricação de produtos: insumos, matérias-primas, manufatura, distribuição, uso, disposição, reuso e reciclagem (CHEHEBE, 1998).

A avaliação do ciclo de vida inclui o exame das entradas e saídas associadas ao produto através de etapas. As entradas compreendem os recursos necessários para a fabricação e transporte do produto, enquanto as saídas contabilizam as emissões e os resíduos que o produto gerou ao longo de sua vida. Os fluxogramas são organizados conforme as etapas, as quais seguem o ciclo de vida do produto (Figura 2).

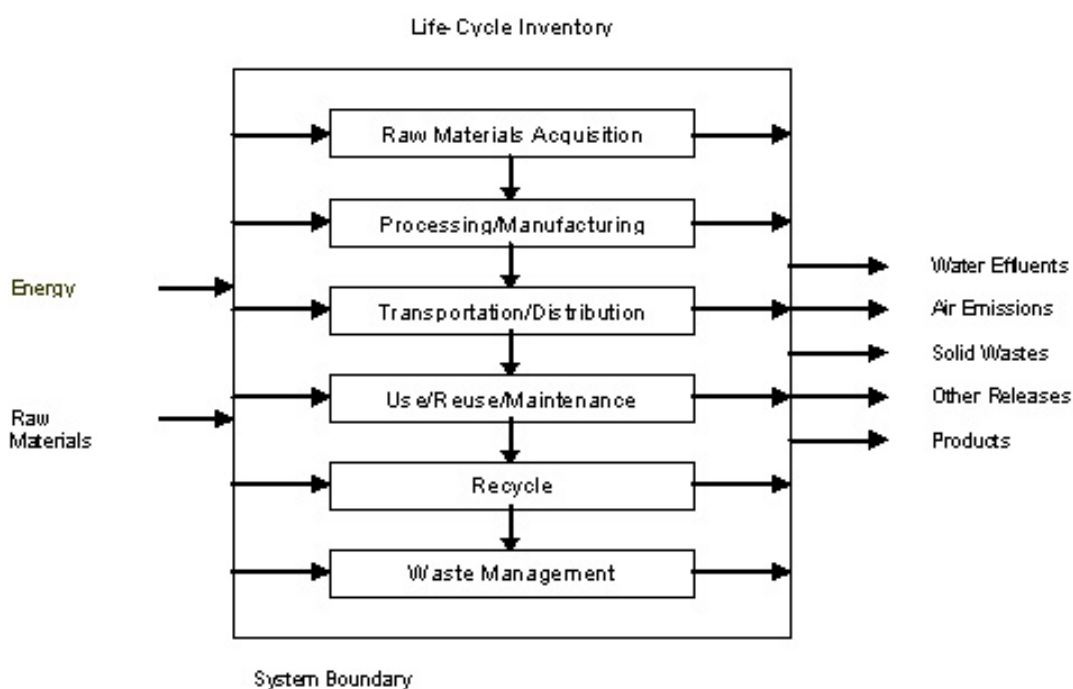


Figura 2: Fluxograma de processos utilizado em ACVs
 Fonte: Society of Environmental, Toxicology and Chemistry – SETAC (1991)

2.1.2. Estrutura da ACV

A ISO 14040 (1997) estabelece que a ACV de produtos deve incluir a definição do objetivo e do escopo do trabalho, uma análise do inventário, uma avaliação de impacto e a interpretação dos resultados (CHEHEBE, 1998). A estrutura de uma ACV e a correlação entre suas fases está representada através da Figura 3.

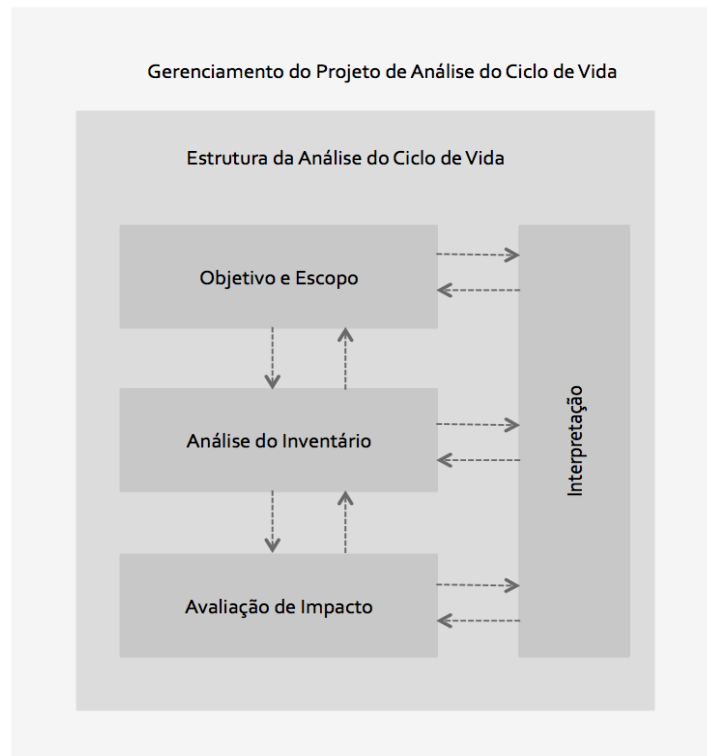


Figura 3: Estrutura de uma ACV
Fonte: Adaptado de TAVARES (2006)

A norma ISO 14040 (1997) determina a estrutura básica de uma ACV, que, por sua vez, deve incluir quatro fases. São elas:

- Objetivo e Escopo
- Análise do Inventário
- Avaliação de Impacto
- Interpretação

Primeiramente deve-se estabelecer o objetivo e escopo, depois realizar uma análise do inventário levantado, escolher uma categoria de impacto ambiental e interpretar os resultados (MONCASTER e SYMONS, 2013).

2.1.3. Pontos de incerteza na ACV

O princípio da ACV está na avaliação dos impactos ambientais associados ao ciclo de vida completo dos produtos e muitas vezes o fluxograma de processo torna-se bastante complexo. Nessas situações dados aparentemente irrelevantes podem ser omitidos e levar a resultados errôneos. Entre os elementos que causam maior variabilidade no resultado das ACVs estão: fatores geográficos e temporais, representatividade tecnológica, fronteiras do sistema e diferentes definições para as categorias de impactos (TAKANO et al., 20014).

Atualmente os protocolos para a condução dos estudos de ACV têm reduzido a discrepância de resultados entre ACVs de um mesmo produto. A transparência do método, a clareza dos limites da análise e a qualidade dos dados são elementos que elevam a confiabilidade da análise. No entanto, a variabilidade de resultados ainda é uma barreira na aceitação da ACV como uma prática objetiva de avaliação de impactos ambientais.

2.1.4. ACV em edificações

A ACV aplicada às edificações considera o ciclo de vida completo do edifício (Figura 4), desde a extração e fabricação dos materiais de construção, transporte até o canteiro, produção da edificação, uso e manutenção durante a vida útil, demolição e disposição dos materiais empregados .Todas as etapas associam, de alguma forma, impactos ambientais.



Figura 4: Ciclo de vida de uma edificação
Fonte: Adaptado de TAVARES (2006)

As três primeiras fases do ciclo de vida da edificação correspondem à etapa pré-operacional, a chamada EE inicial, ou seja, o total de energia requisitada para a fabricação dos materiais, transporte até o canteiro e construção da edificação. Na etapa operacional é contabilizada a energia despendida para o uso e ocupação da edificação, além da EE nos materiais utilizados para manutenção ao longo da vida útil. A etapa pós-operacional considera a energia requisitada para demolição, transporte dos resíduos e eventual processo de reciclagem, conforme representado pela Figura 5.

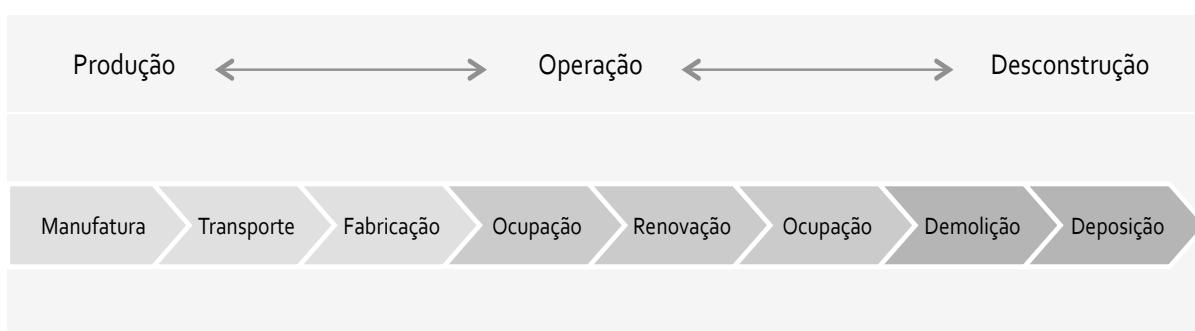


Figura 5: Etapas do ciclo de vida de uma edificação
Fonte: Adaptado de ADALBERTH (1997)

2.2. ANÁLISE DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO

As ACVs podem ser bastante complexas, além de demandar tempo e recursos para que sejam realizadas. Na medida em que a análise torna-se mais detalhada, surgem limitações durante o processo. A ACVE é uma forma simplificada de conduzir uma ACV (FAY, TRELOAR e IYER-RANIGA, 2000). Esta metodologia baseia-se no método de ACV e na norma ISO 14040, cujo foco está no inventário de dados de consumo energético, diretos e indiretos, em todas as etapas do ciclo de vida do produto.

Os edifícios são produtos complexos, pois têm uma vida relativamente longa, sofrem constantes alterações, possuem múltiplas funções e contêm muitos componentes distintos (BRIBIÁN, CAPILLA e USÓN, 2011). Assim, os estudos de ACVE adequam-se melhor às edificações, não apenas pela simplicidade metodológica mas porque são particularmente relevantes para o setor da construção civil, o qual, nos últimos anos, vem buscando edifícios energeticamente mais eficientes.

2.2.1. Conceito de EE

A EE em um produto compreende a energia necessária para a extração, transporte e refino das matérias-primas dos materiais, e em seguida, para a fabricação de componentes e montagem do produto (FAY, TRELOAR e IYER-RANIGA, 2000). No âmbito da construção civil. A EE inicial é o total dos requisitos energéticos para construir a edificação.

Durante o ciclo de vida das edificações existem três momentos em que se contabiliza a EE. Na etapa pré-operacional considera-se, diretamente, toda a energia consumida para a obtenção do material de construção; e indiretamente, inclui-se a extração e beneficiamento, o transporte de materiais até o canteiro e a energia requisitada na obra. Na etapa operacional considera-se a EE de Manutenção, relacionada à adição e substituição de materiais ao longo da vida útil da edificação. A Energia de Desconstrução, na etapa pós-operacional é referente à demolição e transporte de resíduos, e quando existe processo de reuso ou reciclagem de materiais pode-se contabilizar um débito de EE.

O cálculo da EE de um material pode ser feito como energia final ou primária, a primeira refere-se à quantidade que realmente foi utilizada em uma edificação ou em um terreno específico, como por exemplo, a quantidade de eletricidade consumida e registrada em uma conta de energia elétrica; já a energia primária refere-se à quantidade de energia utilizada para produzir uma quantidade de energia final (ROAF, 2014). Isso significa que devido a determinadas ineficiências nos sistemas de geração e transporte de energia, para cada unidade de energia fornecida foi requisitada uma quantidade maior de energia primária para sua obtenção.

2.2.2. Método de análise de EE

Um grande número de métodos foram desenvolvidos para calcular a EE da forma mais completa e exata possível, entre eles a análise de processo, a análise por insumo x produto e a análise híbrida (FAY, TRELOAR e IYER-RANIGA, 2000). Para calcular com precisão a EE em um material deve-se considerar todos os estágios que tiveram requisito de energia, sendo que esta é a chamada análise de processo. A análise por insumo x produto considera dados da economia nacional e dados de energia dos setores econômicos, e a unidade utilizada é MJ/\$. O método de análise híbrida reduz as incertezas dos resultados ao combinar a análise de processo com dados estatísticos. Ainda é possível utilizar dados de energia provenientes do setor industrial e do governo para realizar uma análise estatística.

2.2.3. Análise energética em edificações

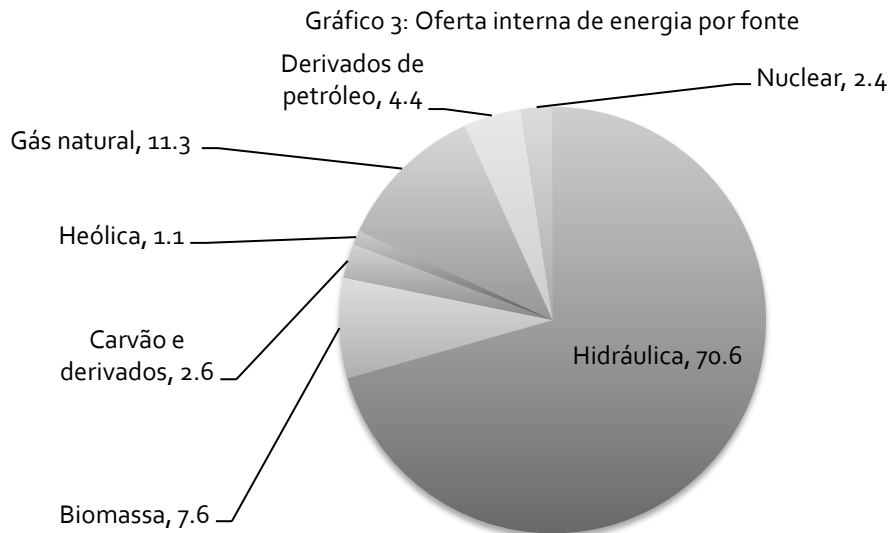
Uma ACVE pode ser usada com propósitos variados como comparar o consumo de energia de prédios com tipologias diversas, ou demonstrar os benefícios de um recurso de projeto para otimizar energia operacional (TAVARES, 2006). É possível estabelecer controle sob o edifício ainda em fase de projeto ou determinar os impactos associados a cada etapa do ciclo de vida da edificação.

Em países de clima frio como a Suécia, a energia requisitada operacionalmente para aquecimento das residências chega a 85% do consumo energético total em um período de 50 anos e a EE inicial corresponde a apenas 14% da energia operacional (ADALBERTH, 1997). Através do método de ACVE é possível avaliar previamente o comportamento da edificação e estabelecer estratégias de mitigação de impactos, tais como: aumentar a EE inicial com o uso de materiais isolantes e, conseqüentemente, reduzir a energia operacional evitando a utilização de sistemas mecânicos de climatização.

Também é possível analisar os efeitos específicos de diferentes materiais de construção e determinar a melhor combinação para um edificação em particular, levando em consideração o clima, os parâmetros de conforto e a composição da matriz energética. Mithraratne (2004) comparou uma edificação com três diferentes composições de materiais, e como resultado encontrou uma variação de 17% de energia operacional e 9% de EE entre os modelos analisados.

2.3. DIÓXIDO DE CARBONO

Parte das taxas de emissões de dióxido de carbono estão ligadas diretamente às fontes de geração de energia. De acordo com o relatório de 2010 da *International Energy Agency* – IEA a matriz energética mundial é composta predominantemente de fontes não renováveis, 32,4% da energia gerada mundialmente é proveniente da queima de óleo diesel e 27,3% da queima de carvão. Se comparado ao cenário nacional, a matriz energética brasileira possui 41% de participação de fontes renováveis, enquanto os países desenvolvidos possuem 8 % e o restante do mundo apenas 13% (BEN, 2015). No Gráfico 3 ilustra-se a oferta interna de energia por fonte, divulgados anualmente pelo Balanço Energético Nacional – BEN.



Fonte: BEN (2015)

Os países com grande geração térmica apresentam perdas de transformação e distribuição. No Brasil estas perdas são menores devido a alta participação da geração hidráulica, esta vantagem complementada pela utilização de biomassa faz com que o Brasil apresente baixa taxa de emissão de CO₂; 1,99 t CO₂/capta. A média mundial é de 4,44 t CO₂/capta (TAVARES, 2006; IEA, 2012).

2.3.1. Método de análise de emissões de dióxido de carbono

A discriminação dos insumos energéticos em fontes específicas e destas para a geração de CO₂ correspondentes são pontos importantes de interpretação em uma análise energética (TAVARES, 2006). Sendo assim, é possível estabelecer um padrão de emissão de dióxido de carbono nos materiais de construção, desagregando o consumo energético da produção por fontes primárias e atribuindo fatores de contribuição de CO₂. Na Tabela 2 é apresentado o percentual de fontes não renováveis por material de construção.

Tabela 2: Percentual de fontes não renováveis por material de construção

Fonte	Eletricidade	Óleo combustível	Gás natural	GLP	Outros secundários de petróleo	Coque de carvão	Coque de petróleo	Carvão mineral	Carvão vegetal	Lenha	Outras
Argamassa	4	86					10				
Bloco cerâmico	2	4		8						85	1
Concreto	9	82					9				
Telha fibrocimento	14	84		2							
Madeira	17	83									
Azulejo cerâmico	12	15	68	5							
Alumínio	54	21	7		4	10					4
Tinta	10	90									
Plástico	26	10	30		34						

Fonte: Adaptado de Tavares (2006)

A contribuição de CO₂ pelas atividades relacionadas à construção civil é um parâmetro de sustentabilidade particularmente relevante no Brasil (LOBO, 2010). Observa-se que grande parte da energia requisitada para a fabricação dos materiais de construção são provenientes de fontes fósseis. Ainda, deve-se considerar também as emissões de gases poluentes, incluindo o dióxido de carbono, associados à reações químicas do processos de fabricação destes produtos.

2.3.2. Carbono estocado

O uso de biocombustíveis e o armazenamento de carbono em produtos é um atributo exclusivo de recursos renováveis de base biológica (LIPPKE et al., 2004). Neste sentido, a utilização de produtos considerados ambientalmente adequados, como a madeira, está sendo uma estratégia eficiente para enfrentar as mudanças climáticas. O carbono armazenado na madeira funciona como uma compensação das emissões geradas durante o ciclo de vida do produto.

O processo de estoque de carbono acontece durante o corte da árvore, quando a estrutura celular desta retém todo o carbono existente, que permanece estocado até que seja liberado para atmosfera através do processo de queima ou biodegradação da madeira.

Este processo permite que parte do carbono armazenado na madeira possa ser estocado em produtos duráveis, como esquadrias, móveis e estruturas.

Segundo Marques (2008), a madeira utilizada nas edificações armazena grandes quantidades de carbono por longos períodos. O mesmo autor ainda afirma que uma típica casa de 200 m² fabricada em madeira, consegue armazenar cerca de 30 toneladas de CO₂, o que é equivalente à sete anos de emissões de um pequeno carro. Através da Figura 6 é possível observar o ciclo do CO₂ com ênfase na construção civil.

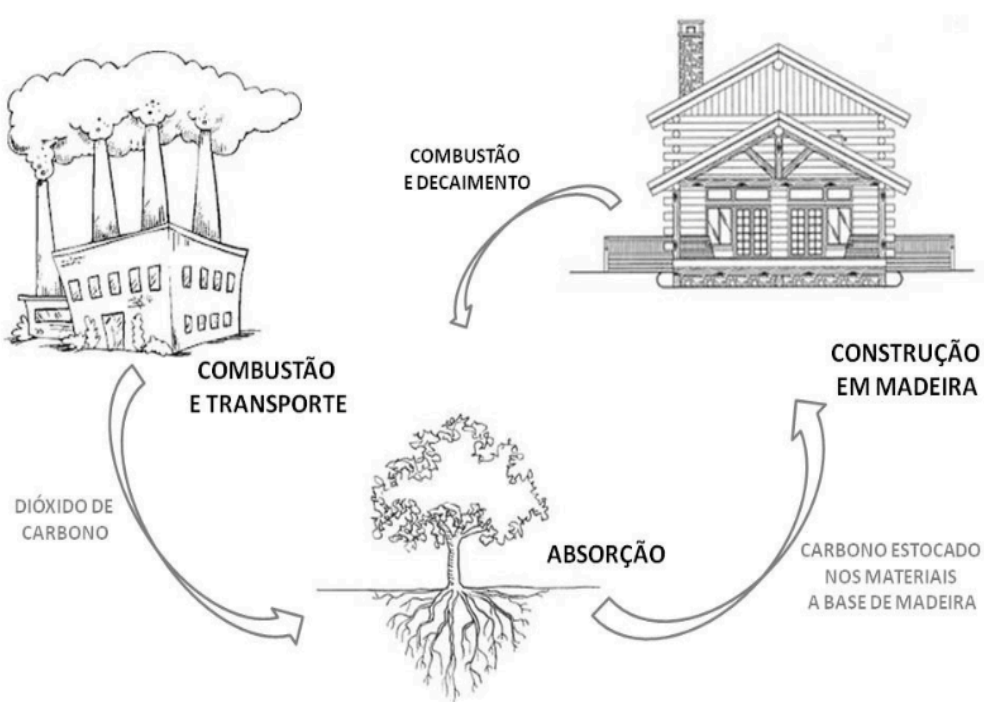


Figura 6: Ciclo do CO₂ com ênfase na construção civil
Fonte: Monich (2012)

Com o passar do tempo a capacidade de reter carbono das árvores diminui a medida em que elas envelhecem e o ritmo de crescimento desacelera, preferindo cortá-las antes que atinjam a maturidade. Por este motivo, o armazenamento de carbono está associado ao planejamento de corte e reflorestamento e ao manejo florestal sustentável, evitando danos aos reservatórios de carbono e mantendo o processo de exploração contínuo e equilibrado. Alerta-se ainda, para o planejamento das áreas de reflorestamento em função da preservação de recursos naturais, equilíbrio do ecossistema e manutenção da fauna e flora local.

2.3.3. Carbono estocado em edificações

Roaf (2014) afirma que a variação do consumo energético entre uma casa que utiliza como sistema construtivo terra apilada e madeira local, e uma casa que utiliza bloco de concreto de densidade média pode chegar à 20%. Em termos de emissões de CO₂, essa diferença chega à 50% ao longo do ciclo de vida da edificação. O nível de CO₂ Embutido dos materiais de construção está diretamente relacionado à origem da energia empregada na sua produção e ao processo de manufatura dos materiais.

Segundo Nässén et al. (2012) os requisitos de calor e energia para produzir os materiais da estrutura de um edifício é de 1,68 GJ / m² para um sistema *wood frame* e de 2,26 GJ / m² para um sistema em concreto. Salazar e Meil (2009) afirmam que uma edificação com uso intensivo de materiais em madeira aumenta em até 36t a fixação de carbono, se comparado à uma edificação típica com estrutura de madeira. Para Wang Toppinen e Juslin (2014) uma das propriedades significativas do uso na madeira no século 21 é a geração de energia a partir de resíduos. Neste sentido, estimula-se a utilização de produtos em madeira como um material ambientalmente adequado e como uma estratégia para reduzir os impactos ambientais das edificações.

2.4. WOOD FRAME

Para melhor compreensão do sistema construtivo *wood frame* e dos materiais de construção civil de madeira, neste tópico são expostas as características tecnológicas do sistema, os processos industriais dos materiais de construção e o processo de exploração florestal.

2.4.1. Tecnologia

O beneficiamento da madeira de florestas plantadas está associado ao desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas à fabricação de produtos. Os processos de manufatura da madeira iniciam-se com a exploração florestal, dando sequência à uma cadeia produtiva de produtos. Segundo a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas - ABRAF (2009), entre os produtos derivados de florestas plantadas destacam-se: a celulose, o papel, os painéis reconstituídos, o compensado, a madeira serrada e o carvão vegetal. Através da Figura 7 ilustra-se a cadeia industrial da madeira no Brasil.

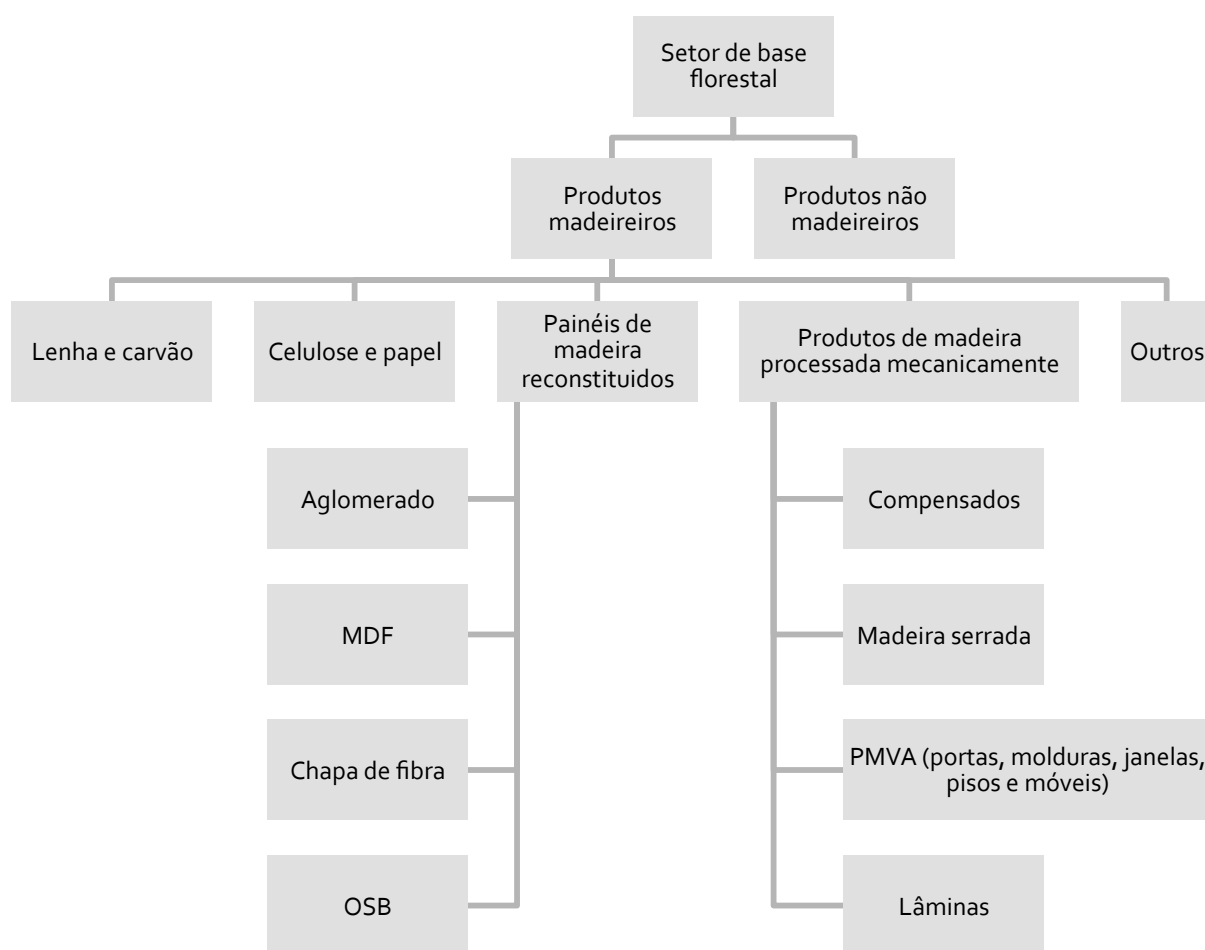


Figura 7: Estrutura da cadeia produtiva da madeira

Fonte: Adaptado da Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente - ABIMCI (2009)

Observa-se que entre os produtos madeireiros, os painéis de madeira reconstituídos e os produtos de madeira processada mecanicamente possuem grande aplicação no setor da construção civil. Pode-se destacar dois produtos que formam a base do sistema construtivo *wood frame*: a madeira serrada e o painel OSB.

O sistema de estrutura leve em madeira, ou *wood frame*, é uma técnica construtiva racionalizada e baseada em etapas, sendo que todo o material é encaminhado à obra na sequência correta de execução, desde a infraestrutura até a cobertura, num processo encadeado de execução, que requer pouca supervisão para operários com treinamento (HILGENBERG, 2003). O processo construtivo se dá em grande parte dentro dos limites da fábrica, e no canteiro as partes da edificação são montadas com grande facilidade, o que torna a obra seca e limpa, pois quase existe baixa geração de resíduos.

Em países como os Estados Unidos o sistema *wood frame* é uma solução convencional no setor da construção civil. A adaptação do sistema a qualquer configuração arquitetônica permite a sua aplicabilidade em diferentes categorias residenciais, desde habitações de interesse social à residências de alto padrão.

O desenvolvimento do sistema construtivo em *wood frame* tem início com o projeto arquitetônico quando é possível estabelecer módulos padronizados para produção e montagem da edificação. Nesta etapa há um trabalho em conjunto entre os profissionais das áreas de projeto e produção. Recentemente, a disponibilidade de software de projeto específicos para sistemas construtivos em madeira como o canadense *MWF Homebuilder*, o norte americano *Wood-E Design Software* e o lituano *Wood Framing Wall* vêm auxiliando arquitetos e engenheiros a compatibilizar os projeto com o sistema de produção. Através da Figura 8 é possível observar as partes que compõe uma habitação em *wood frame*.

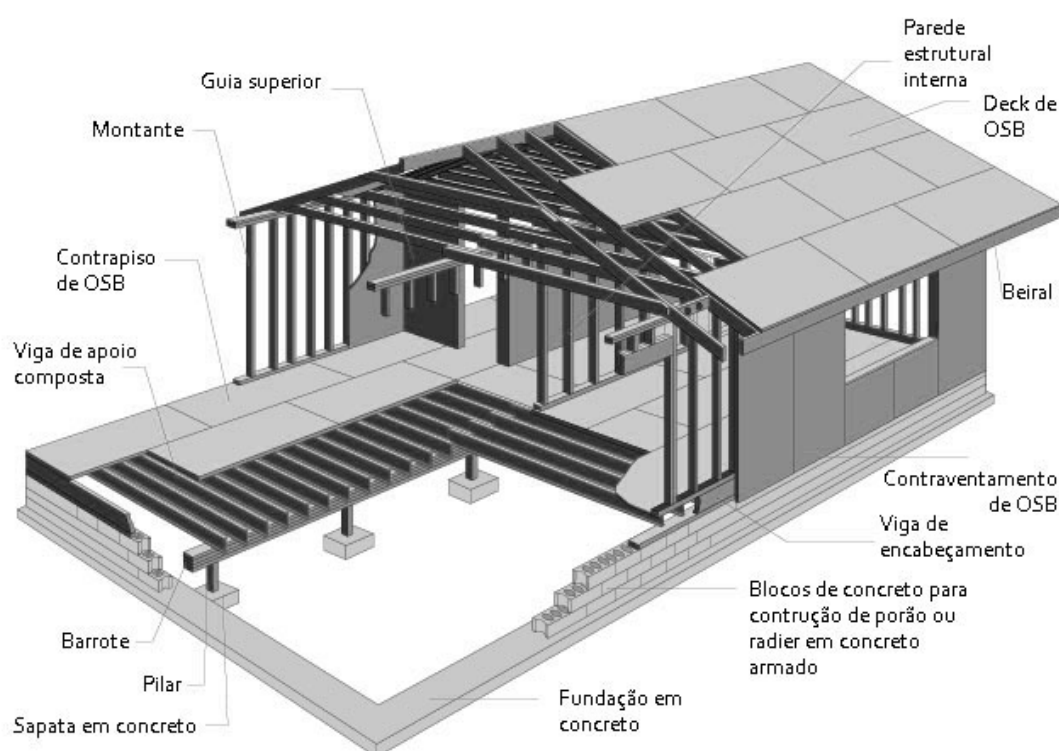


Figura 8: Componentes da habitação em *wood frame*
Fonte: Adaptado de Wood University (2015).

O processo de produção inclui a confecção de paredes pré-montadas, através de painéis constituídos por montantes internos e peças da base e do topo. A montagem da edificação é realizada sob um *radier* de concreto ou paredes estruturais que configuram um

porão. As paredes são fixadas na base estrutural em concreto e amarradas lateralmente entre painéis paralelos e transversais. Posteriormente são fixados os painéis externos aos montantes, os fechamentos internos só são feitos após a execução das instalações elétricas e hidráulicas. A instalação dos dutos hidráulicos é passada pelos montantes e a fiação elétrica não requer eletrodutos (MONICH, 2012).

Segundo Hilgenberg (2003), nos Estados Unidos, o sistema construtivo *wood frame* se desenvolveu de tal forma que se passou a executar construções obedecendo apenas às prescrições geométricas disponíveis em um manual direcionado para engenheiros. O *Wood Frame Construction Manual* - WFCM (2015) é um material desenvolvido pelo *American Wood Council* – AWC. Esta, é uma ferramenta simples, de fácil aplicação e possui as orientações necessárias para dimensionar a estrutura da edificação corretamente.

O WFCM possui restrições de aplicação quanto ao dimensionamento da edificação e é direcionado à habitações para uma ou duas famílias. Além deste, existem outros manuais igualmente importantes que podem ser citados; o americano *Details for Conventional Wood Frame Construction* (2001), desenvolvido pelo *American Forest & Paper Association* e o canadense *Canadian Wood Frame House Construction* (2013), publicado pelo *Canadian Mortgage and Housing Corporation*.

No Brasil, a norma correspondente aos manuais utilizados no exterior é a NBR 7190: 1997 - Projeto de Estruturas de Madeira, nela estão apontados os principais requisitos da madeira para o uso na construção de habitações e uma metodologia para determinar as propriedades físicas da madeira. Por se tratar de um sistema construtivo inovador no país, recentemente foi elaborado um Documento de Avaliação Técnica – DATec, redigido pela Instituição Técnica Avaliadora – ITA que indica o atendimento do sistema às normas nacionais e ao cumprimento dos requisitos de desempenho. Este documento serviu para que o sistema fosse aprovado pelo Sistema Nacional de Avaliação Técnica – SiNAT, dando origem à Diretriz SiNAT 005 (2011). Esta foi uma iniciativa para avaliar e operacionalizar o sistema na construção civil brasileira. A partir da publicação da Diretriz as construções em *wood frame* devem seguir os requisitos expostos no documento.

Conforme descrito anteriormente, no Capítulo 1, faz parte desta dissertação a avaliação de dois padrões construtivos do sistema *wood frame*. Para a seleção destes, considerou-se a aplicabilidade da técnica na construção civil nacional. Os padrões construtivos selecionados estão detalhados e especificados no Capítulo 5.

2.4.2. Materiais

A madeira serrada e outros materiais de construção à base de madeira são utilizados na estrutura, vedação e acabamento do sistema construtivo *wood frame*. Entre eles, pode-se destacar a utilização dos painéis OSB. Este, é um painel com característica estrutural e com grande aplicabilidade na construção civil. No sistema em *wood frame*, os painéis OSB são projetados especificamente para a confecção de vigas, fechamentos, sistemas de contraventamento, pisos e telhados.

O OSB é produzido por processamento de toras de madeira, e a fabricação dos painéis envolve a colagem de partículas de madeira com resina resistente à umidade. No Brasil, o OSB é composto por quatro camadas: duas externas orientadas no sentido longitudinal e duas internas, cruzadas no sentido perpendicular (Figura 9). O controle do tamanho das tiras e a orientação das camadas permitem que as propriedades dos painéis sejam manipuladas para adequar a diferentes usos.

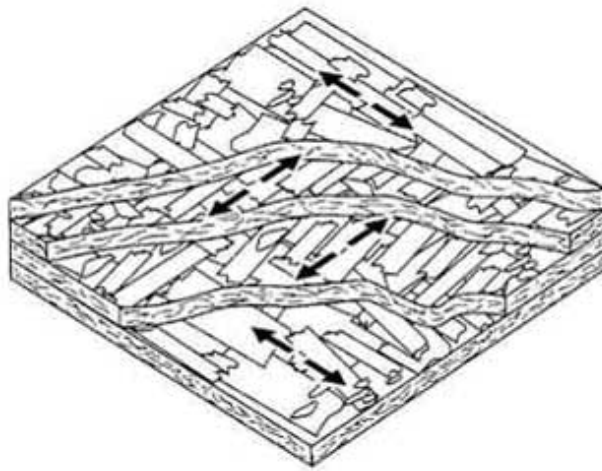


Figura 9: Painel OSB
Fonte: LP Building Products Brasil (2016)

O transporte é a primeira etapa do processo da fabricação do painel OSB. As toras são transportadas da floresta para a fábrica por caminhão. Calcula-se que a distância média de transporte é de 143km (PUETTMANN et al., 2013) Na fábrica, as toras são descascadas e cortadas em partículas ao longo do sentido das fibras. As partículas são secas, misturadas em uma composição de resina e cera e prensadas sob calor e pressão, formando os painéis. O final do processo da fabricação inclui o corte dos painéis em tamanho comercial e embalagem do produto. O processo de serragem e lixa do OSB gera um fluxo de resíduos,

estes podem ser vendidos como subproduto ou utilizados como combustível para geração de energia na forma de calor. O fluxograma industrial do OSB é apresentado no tópico 4.2.

Após a chegada das toras nas instalações de processamento, o primeiro passo para o processo de manufatura da madeira serrada é classificação das toras conforme o diâmetro e posteriormente as toras são levadas ao processo de descascamento. As toras descascadas são encaminhadas para o desdobro principal, onde passam por uma serra de fita, obtendo-se um bloco principal e costaneiras. O bloco principal é encaminhado para um conjunto de serras, constituindo o produto principal: as tábuas. As costaneiras provenientes do processo da serra podem ser reaproveitadas e transformadas em partículas. Finaliza-se o processo industrial da madeira serrada com a secagem natural das tábuas ao ar livre ou em estufa. O fluxograma industrial da madeira serrada é apresentado no tópico 4.2.2

Os subprodutos gerados a partir dos processos industriais da madeira serrada possuem grande aplicabilidade. As cascas podem ser utilizadas para abastecer fornos de biomassa ou vendidos para horticultura. As partículas são vendidas para a geração de energia ou para a fabricação de painéis engenheirados. A maior parte das cascas são queimadas no local para fornecer parte da ETérmica requisitada para o processo de secagem da madeira.

2.4.3. Operações florestais

Na produção de matéria-prima à base de madeira, quantidades consideráveis de mão de obra, energia e recursos financeiros são gastos nas operações florestais (BOYD et al., 1977). Estas atividades seguem uma sequência de quatro processos: plantação, gestão, colheita e transporte. O processo de plantação reúne todos os esforços necessários para o estabelecimento da floresta. Enquanto a gestão engloba desde a aplicação de produtos químicos à prevenção de incêndio e construção de estradas de acesso à floresta. A colheita inclui o desbaste e corte final das toras. O último processo, compreende o transporte das toras e cavacos da floresta para as instalações de processamento ou portos.

Os impactos ambientais das operações florestais variam conforme o desenvolvimento tecnológico e a produtividade local. O sistema de colheita mecanizada utiliza equipamentos florestais para realizar as atividades de corte da árvore, remoção de galhos e corte da tora em comprimento comercializável, transporte das toras até o ponto de carga e carregamento de veículos para o transporte. Entre os equipamentos florestais comumente utilizados está o *Feller-Buncher* (Figura 10).



Figura 10: *Feller- Buncher*
Fonte: John Deere (2016)

Ao longo dos anos os equipamentos utilizados na indústria florestal e madeireira têm evoluído rapidamente. Atividades, que anteriormente eram realizadas manualmente, agora são executadas por máquinas que incorporam alta tecnologia e precisão. O *Feller-Buncher* é uma máquina de colheita utilizado para exploração madeireira. É um veículo motorizado capaz de cortar e recolher rapidamente certa quantidade de árvores antes da derrubada. Este equipamento é composto por um dispositivo de prensa hidráulica ou elétrica e uma serra circular ou tesoura. Após o corte, a máquina posiciona as toras adequadamente para o processo de transporte, realizado por outro equipamento, o *Forwarder* (Figura 11).



Figura 11: *Forwarder*
Fonte: John Deere (2016)

O desenvolvimento e utilização de equipamentos florestais têm como objetivo reduzir a mão de obra e o consumo energético necessário para a realização das atividades. O *Harvester* é um equipamento que combina três funções: a derrubada da árvore, o desbaste e o corte (Figura 12). Estes equipamentos utilizam como combustível o óleo diesel e associam requisitos energéticos distintos, conforme as variações de tamanho do equipamento.



Figura 12: *Harvester*
Fonte: John Deere (2016)

Os primeiros equipamentos florestais começaram a ser desenvolvidos em 1850, e mais de um século depois, a capacidade operacional de um *Feller-Buncher* era de 1 à 2 árvores por minutos (KOCH e COUGHRAN, 1975). Atualmente, a capacidade operacional deste mesmo equipamento é de 74,9 m³ de madeira por hora e o rendimento energético é de 0,39 litros de combustível por m³ de madeira. A capacidade operacional e o rendimento energético do *Forwarder* é de 42,8 m³/h e 0,40 l/ m³, respectivamente, enquanto a do *Harvester* é de 35,4 m³/h e 0,53 l/ m³ (JUNIOR e SEIXAS, 2012).

2.5. CONCLUSÃO DA REVISÃO DE LITERATURA

Em relação às conclusões obtidas neste capítulo, pode-se afirmar que os princípios da ACV e da ACVE fundamentam o método utilizado para determinar os requisitos energéticos nos processos industriais dos materiais de construção, aplicado no Capítulo 4. A revisão da literatura sobre o dióxido de carbono, determina tanto os parâmetros de geração de CO₂ por fonte energética, quanto o cálculo de carbono estocado nos materiais de construção de madeira. Através do conteúdo revisado sobre o sistema *wood frame* são selecionados os padrões construtivos e definidos os materiais de construção para as análises energéticas. O enfoque sob as operações florestais justifica o pressuposto de que os materiais de construção de madeira apresentam importante impacto ambiental associado ao processo de exploração florestal (BOYD et al., 1977).

3. ESTADO DA ARTE: EE E CO₂ EMBUTIDO EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Nesse capítulo serão listados estudos existentes sobre a EE e o CO₂ Embutido nos materiais de construção e em sistemas construtivos em madeira. Estes trabalhos serão utilizados nas seções seguintes para avaliar a variabilidade de dados, estabelecer os padrões construtivos do sistema *wood frame* e estipular cenários de avaliação.

3.1. ANÁLISE DE ESTUDOS EXISTENTES

O método de ACV não é um conceito novo, sendo assim seria possível citar uma extensa bibliografia sobre o tema. O que segue é um breve exame de estudos de ACV em materiais de construção. Embora o foco de alguns trabalhos seja o ciclo de vida completo dos produtos, esta seção limita-se a analisar a EE e o CO₂ Embutido associados à extração, transporte e produção de materiais de construção. Os trabalhos estão resumidos no Quadro 3 e foram selecionados visando a investigação da variabilidade de resultados.

Quadro 3: Sumário dos trabalhos revisados

Título	Autores	Ano
Energy analysis of 108 industrial processes	Brown, Hamel e Hedman	1996
Rendimento do processo produtivo e energético da matéria-prima de uma indústria de base florestal	Brand	2000
Life-cycle analysis of wood products: cradle-to-gate LCA of residential wood building materials	Puettmann e Wilson	2005
Global sustainability and the New Zealand house	Alcorn	2010
Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential	Briabán et al.	2011
Inventory of Carbon & Energy – ICE	Hammond e Jones	2011
Cradle-to-gate inventory of wood production from Australian softwood plantations and native hardwood forests: Embodied energy, water use and other inputs	May et al.	2012
Cradle to Gate Life Cycle Assessment of Oriented Strand Board Production from the Southeast	Puettmann et al.	2013
Aspectos ambientais e de custo de produção do sistema plataforma em madeira para habitação de interesse social: estudo de caso em Florianópolis	Souza	2013
Greenhouse gas and energy based life cycle analysis of products from the Irish wood processing industry	Murphy, Devlin e McDonnell	2015
Wood frame, energia embutida e emissão de CO ₂ : uma análise comparativa ao sistema construtivo convencional	Oliveira et al.	2015

3.1.1. Brown, Hamel e Hedman (1996)

O relatório *Energy Analysis of 108 Industrial Process*, desde 1985, é utilizado como uma referência básica para a análise da indústria de manufatura dos Estados Unidos. As informações contidas no relatório são utilizadas para compreender processos industriais, avaliar tecnologias de processamento e desenvolver programas de conservação. Esta, é uma das poucos referências de texto detalhadas disponíveis, o livro forneceu dados para a criação do *Major Industrial Plant Databases – MIPD* do *Dun & Bradstreet Technical Economic Service*, em Cambridge.

O método e a estrutura dos diagramas de fluxos e dos dados do relatório fornecem uma estrutura básica para o entendimento dos processos industriais, podendo incorporar alterações de acordo com a indústria. Os modelos de processos e os balanços energéticos fornecem uma base para a atualização contínua à medida que novos dados e informações tornam-se disponíveis. As indústrias abordadas no relatório representam mais de 70% do consumo energético no setor industrial dos Estados Unidos.

Na inviabilidade de produzir o relatório com dados primários, os autores utilizaram como fonte de dados: diagramas de fluxos de processos, consultores industriais, o *Guide to Data Sources for Manufacturing of United States* e outras fontes secundárias e terciárias. Os dados coletados são agregados para obter uma planta sintetizada de um determinado setor industrial. Após esta etapa, são conduzidos dois levantamentos locais para fornecer uma revisão sobre as configurações gerais dos processos e coletar informações adicionais para as análises energéticas. A etapa final do desenvolvimento da base de dados envolve o balanço de massa e energia pelas unidade base.

Entre os 108 processos industriais que constituem o relatório, pode-se destacar, pela convergência com a linha de pesquisa desta dissertação, os fluxogramas de processos e os balanços energéticos de dez materiais de construção. Sendo dois materiais de madeira explorados detalhadamente no Capítulo 4.

3.1.2. Brand (2000)

Em sua dissertação, Brand (2000) realiza uma avaliação do rendimento do processo produtivo e energético da matéria-prima de uma indústria de base florestal. Primeiramente a autora levanta as características do processo produtivo para determinar o rendimento produtivo e o balanço de materiais. Posteriormente é determinado o rendimento e o

balanço energético através da análise de disponibilização e uso de resíduos destinados à geração de energia, quantidade de energia térmica e elétrica geradas, consumo e potencial produtivo energético dentro do processo industrial.

Estudos anteriores serviram para realizar um comparativo com os dados produzidos na dissertação. Nas Tabela 3 e 4 ilustra-se os dados retirados, pela autora, de Kock (1976) e Ekono (1980). Os resultados da análise foram obtidos a partir de uma abordagem *gate-to-gate* do processo de manufatura de produtos de madeira e estão apresentados na Tabela 5, o estudo não inclui o uso de combustíveis fósseis para geração de ETérmica.

Tabela 3: Consumo de energia elétrica para a manufatura de produtos - madeira de coníferas

Produto	Quantidade (kg)	Total ¹ (MJ)	Líquido ² (MJ)
Madeira serrada	1000	473,83	537,33
Compensado	1000	82,08	367,95

1 - Energia necessária para a colheita, manufatura dos aditivos e manufatura do produto.

2 - Energia necessária para a manufatura do produto.

Fonte: Adaptado de Brand (2000)

Tabela 4: Consumo de energia elétrica e térmica para a manufatura de produtos - madeira de folhosas

Produto	Requerimento de energia elétrica (MJ/m ³)	Requerimento de energia térmica (MJ/m ³)	EE Total (MJ/m ³)
Madeira serrada	144	1507	1651
Compensado	864	4621	5485

Fonte: Adaptado de Brand (2000)

Tabela 5: Consumo de energia elétrica para a manufatura de produtos

Produto	Requerimento de energia elétrica (MJ/m ³)
Madeira serrada	400
Painéis manufaturados	445

Fonte: Adaptado de Brand (2000)

3.1.3. Puettmann e Wilson (2005)

Puettmann e Wilson (2005) conduziram uma ACV em produtos de madeira em duas localidades nos Estados Unidos: norte da costa oeste e sul da costa leste. Os cálculos de transporte da matéria-prima até a fábrica e desta até a edificação variam conforme as localidades e produtos. A abordagem da análise é do tipo *cradle-to-gate* e os materiais avaliados são: madeira laminada colada, madeira serrada, madeira verde, madeira compensada, painel laminado estrutural e OSB. Na Tabela 6 são apresentados os valores de EE por material no norte da costa oeste e, na Tabela 7, no sul da costa leste.

Tabela 6: EE nos materiais por etapa do ciclo de vida - Norte da costa oeste (MJ/m³)

Etapa	MLC	Madeira serrada	Madeira verde	Madeira Compensada	Painel laminado estrutural
Colheita	147	143	139	148	148
Manufatura	5059	3415	295	4425	2700
Transporte	161	147	113	112	789
Total	5367	3705	548	4684	3638

Fonte: Adaptado de Puettmann e Wilson (2005)

Tabela 7: EE nos materiais por etapa do ciclo de vida - Sul da costa leste (MJ/m³)

Etapa	MLC	Madeira serrada	Madeira compensada	Painel laminado estrutural	OSB
Colheita (MJ)	213	203	189	206	217
Manufatura	5640	3175	5748	5248	10538
Transporte	391	114	219	196	390
Total	6244	3492	6156	5649	11145

Fonte: Adaptado de Puettmann e Wilson (2005)

A maior parte da EE nos materiais é oriunda da manufatura, especificamente do processo de secagem da madeira. A origem da energia utilizada nos processos industriais gerou variabilidade de emissão de CO₂ entre as duas extremidades dos país. A eletricidade produzida no sul da costa leste utiliza 46% de combustíveis fósseis, enquanto o norte da costa oeste utiliza 72%. A Tabela 8 apresenta os valores de CO₂ Embutido nos materiais por localidade.

Tabela 8: CO₂ Embutido nos materiais (kgCO₂/kg)

Localidade	MLC	Madeira serrada	Madeira verde	Madeira compensada	Painel laminado estrutural	OSB
Norte da costa oeste	0,73	0,61	0,06	0,43	0,42	---
Sul da costa leste	0,78	0,60	---	0,60	0,64	1,03

Fonte: Adaptado de Puettmann e Wilson (2005)

3.1.4. Alcorn (2010)

Em sua tese, Alcorn determina a EE e o CO₂ Embutido em materiais de construção para responder a seguinte pergunta: “Como construir uma casa sustentável na Nova Zelândia?” As análises tratam o processo produtivo dos materiais como uma única operação e estão organizadas em ingredientes, insumos energéticos, transporte, equipamentos e saídas. Os dados foram obtidos a partir de fabricantes e o limite de análise foi o portão da fábrica. Na Tabela 9 são ilustrados os resultados de EE e CO₂ Embutido obtidos pelo autor.

Tabela 9: EE e CO₂ Embutido nos materiais de construção

Material	EE (MJ/kg)	CO ₂ Embutido (kgCO ₂ /kg)
Madeira serrada	8,9	- 0,00132
<i>Fiberboard</i>	12,0	- 0,32

Fonte: Adaptado de Alcorn (2010)

3.1.5. Bribián et al. (2011)

Bribián et al. (2011) realizaram uma avaliação da EE e o CO₂ Embutido em materiais de construção convencionais e materiais ambientalmente adequados através do método de ACV. A análise é do tipo *cradle-to-grave* e quantifica os requisitos energéticos em suas fontes primárias. A unidade funcional é 1kg de material e as etapas consideradas são: manufatura, transporte até o canteiro, construção, demolição e disposição final. Os coeficientes de transporte utilizados estão representados na Tabela 10.

Tabela 10: Coeficientes de transporte

Categoria de impacto	Rodoviário (caminhão)	Ferroviário	Transoceânico (navio)
EE (MJ/km)	3,26	0,75	0,17
CO ₂ Embutido (kgCO ₂ /km)	0,19	0,03	0,01

Fonte: Adaptado de Bribián et al. (2011)

Entre os materiais avaliados pelos autores destacam-se aqueles que são relevantes para a presente pesquisa. Os resultados de EE e o CO₂ Embutido nestes materiais são demonstrados na Tabela 11.

Tabela 11: EE e CO₂ Embutido nos materiais de construção

Material	Densidade (Kg/m ³)	EE (MJ/kg)	CO ₂ Embutido (kgCO ₂ /kg)
Madeira serrada	600	20,99	0,30
<i>Particleboard</i>	600	34,64	0,03
OSB	600	36,33	0,62

Fonte: Adaptado de Bribián et al. (2011)

3.1.6. Hammond e Jones (2011)

Em 2011, os pesquisadores da *University of Bath* realizaram uma atualização nos dados de EE e CO₂ Embutido nos materiais de construção do *Inventory of Carbon and Energy* – ICE. Entre os materiais que compõem este inventário, foram selecionados aqueles que demonstram relevância para esta pesquisa. Na Tabela 12 ilustra-se os dados de EE nos materiais de construção selecionados. Segundo os autores, os valores de CO₂ Embutido nos produtos em madeira são difíceis de estimar devido a alta variabilidade de dados.

Tabela 12: EE e CO₂ Embutido nos materiais de construção de madeira (MJ/kg)

Material	EE
Madeira serrada	10,4
<i>Fiberboard</i>	11,0
<i>Particleboard</i>	14,5
OSB	15,0

Fonte: Adaptado de Hammond e Jones (2011)

A análise dos materiais estão catalogadas por uma ficha padrão, a qual informa as características dos materiais, limites da análise, detalhes dos processos, fontes energéticas e outras informações relevantes para a comparabilidade de dados.

3.1.7. May et al. (2012)

May et al. (2012) produziram um inventário *cradle-to-gate* para a madeira proveniente de florestas plantadas de coníferas e florestas nativas de folhosas na Austrália. O estudo inclui todas as operações envolvidas no plantio da floresta, manejo e colheita e transporte das toras e cavacos para processamento. O inventário está baseado em dados fornecidos por produtores florestais, gestores e prestadores de serviços de sete regiões da Austrália. O *software* de ACV *SimaPro* foi utilizado para combinar diferentes operações e associá-las aos requisitos de combustível e material. Os produtos incluídos na análise são: madeira serrada, toras, toras para celulose e cavacos de madeira.

Considera-se significativo, para esta dissertação, os dados relacionados às etapas de colheita e transporte da madeira de florestas plantadas. A madeira utilizada como matéria-prima para produção de produtos de madeira são provenientes, em sua maior parte, de florestas reflorestadas de *Pinus* e *Eucalyptus*. Destaca-se a média dos requisitos energéticos nas operações florestais e a contribuição relativas de cada etapa, apresentados através das Tabela 13 e 14, respectivamente.

Tabela 13: Média dos requisitos energéticos nas operações florestais (MJ/m³)

Etapa		EE	EE Total
Implantação e manejo	Plantio	0,4	173
	Estabelecimento	7,7	
	Gestão	12	
Colheita	Desbaste	29	
	Derrubada	36	
	Lascas	8,1	
Transporte		80	

Fonte: Adaptado de May et al. (2012)

Tabela 14: Contribuição relativas às operações florestais (%)

Etapa	Coníferas de florestas plantadas	Folhosas de floresta nativa
Plantio	1	4
Fertilização	---	15
Manejo	2	7
Colheita	44	24
Lascas		5
Acesso à floresta	8	---
Transporte	45	45

Fonte: Adaptado de May et al. (2012)

3.1.8. Puettmann et al. (2013)

O *Consortium for Research on Renewable Industrial Materials* – CORRIM é um banco de dados de ACV norte americano direcionado à análises em produtos em madeira. Os dados do inventário incluem todas as etapas de processamento: desde a regeneração da floresta até o produto acabado e embalado. O inventário completo inclui nove produtos em madeira e neste estudo os autores buscam atualizar os processos industriais do OSB, passando de uma abordagem *gate-to-gate* para *cradle-to-gate*.

A unidade funcional é 1m^3 e os limites do sistema incluem: plantio das mudas, manejo florestal, fertilização, desbaste, colheita final, transporte até a fábrica e fabricação. Os processos industriais dos painéis de OSB incluem cinco etapas: manipulação e descamação, secagem e triagem, mistura, formação e acabamento e embalagem. Na Tabela 15 ilustra-se a emissão e estoque de dióxido de carbono associadas à produção de 1m^3 de OSB.

Tabela 15: CO₂ Embutido em 1m^3 de OSB

	Operações Florestais	Fabricação	Total
EE (MJ / m^3)	232	9521	9753
CO ₂ Embutido (kg CO ₂ / m^3)	15	274	290

Fonte: Adaptado de Puettmann et al. (2013)

Nos Estados Unidos há uma corrente dominante nos estudos de ACV em produtos de madeira que considera o CO₂ absorvido pelo ecossistema florestal. Neste estudo, os

autores assumiram que 290 kg CO₂ foram liberados na produção de 1m³ de OSB enquanto 1142 kg de CO₂ foram estocados.

3.1.9. Souza (2013)

Em sua dissertação, Souza (2013) elaborou uma avaliação dos parâmetros de sustentabilidade ambiental e econômica considerando os subsistemas de uma habitação de interesse social construída com o Sistema Plataforma em Madeira. Os critérios de avaliação ambiental de maior relevância são os requisitos energéticos associados aos processos de manufatura dos materiais e fabricação das residências. Na Tabela 16 ilustra-se a energia requisitada nas etapas de manufatura da madeira serrada.

Tabela 16: Consumo de energia no processo de manufatura da madeira serrada (MJ/kg)

Etapa	Consumo médio de energia	Consumo total
Desdobro	0,23	1,10
Secagem	0,32	
Beneficiamento	0,14	
Tratamento	0,41	

Fonte: Adaptado de Souza (2013)

Os resultados de CO₂ Embutido nos modelos residenciais foram obtidos a partir de bases de dados já citadas na presente dissertação, por isso sua análise não é relevante para esta pesquisa. O Sistema Plataforma em madeira utilizado por Souza (2013) foi retirado de Espindola (2010) e os detalhes serão revistos na seção 5.1.

3.1.10. Murphy, Devlin e McDonnell (2015)

Murphy, Devlin e McDonnell (2015) realizam um estudo para determinar e analisar as entradas de energia e de insumos na produção de cinco produtos de madeira, sendo eles: madeira serrada, cavacos de madeira, painéis à base de madeira, pranchas de madeira e aglomerados de madeira. Os resultados finais são expressos em emissão de gases de efeito estufa. Os autores exploram sete cenários da indústria de processamento de madeira na Irlanda, sendo que os limites da análise incluem as operações florestais e transporte. Considera-se relevante, para esta pesquisa, os resultados obtidos para três cenários:

- Cenário 1: Serraria convencional onde as toras são serradas para a produção de tábuas, com geração de subprodutos em forma de partículas de serragem. A casca é utilizada para abastecer fornos de biomassa ou vendida para horticultura, as partículas são vendidas para geração de energia ou fabricação de painéis de madeira. Parte da serragem é utilizada para abastecer os fornos de biomassa ou vendida para fabricação de painéis ou *pellets* de biocombustível. Utiliza-se combustíveis fósseis para completar a geração de energia a partir de biomassa.
- Cenário 6: Produção de *fiberboard* composto por fibras de madeira. Os principais passos incluem a transformação da madeira em fibras, secagem, mistura com aditivos e prensa. O calor para o processo de secagem é fornecido pela queima de biomassa e gás natural.
- Cenário 7: produção de painéis OSB composto por partículas de madeira prensadas com cera e resinas sintéticas sob calor e pressão. Os principais processo na fabricação do OSB incluem: descasque das toras, secagem, triagem, mistura com aditivos e prensa. O calor para o processo de secagem é fornecido pela queima de biomassa e um gerador a diesel.

Os resultados para a categoria de impacto GWP e a demanda de energia acumulada são expresso para 1 m³ de madeira serrada (cenário 1), *fiberboard* (cenário 6) e OSB (cenário 7). Na Tabela 17 ilustra-se os resultados obtidos pelos autores.

Tabela 17: GWP e demanda de energia acumulada nos cenários 1, 6 e 7

Categoria de impacto	Cenário 1 (Madeira serrada)	Cenário 6 (<i>Fiberboard</i>)	Cenário 7 (OSB)
EE (MJ/m ³)	761	17901	5569
CO ₂ Embutido (kgCO ₂ /m ³)	42	896	235

3.1.11. Oliveira et al. (2015)

Oliveira et al. (2015) desenvolveram um comparativo, em termos de energia e o carbono embutidos, entre o sistema construtivo *wood frame* e a alvenaria convencional. A edificação selecionada para o estudo é uma unidade habitacional unifamiliar de 48m². O quantitativo de EE e CO₂ Embutido nos sistemas construtivos estão ilustrados na Tabela 18.

Tabela 18: Total de Energia Embutida e CO₂ Embutido nos sistemas construtivos

Sistema construtivo	Energia Embutida Total (MJ)	Energia Embutida (MJ/m ²)	CO ₂ Embutido Total (kg)	CO ₂ Embutido (kg/m ²)
Residência em <i>wood frame</i>	40102	891	2214	49
Residência em alvenaria convencional	70586	1471	5460	114

Fonte: Adaptado de Oliveira et al. (2015)

Os dados de EE e CO₂ Embutido nos materiais de construção foram retirados do inventário de Hammond e Jones (2011) e da tese de Tavares (2006). O sistema *wood frame* selecionado por Oliveira et al. (2015) bem como os quantitativos de materiais que compõem este padrão construtivo serão detalhados e utilizados na seção 5.1.

3.2. VARIABILIDADE ENTRE OS ESTUDOS

Neste tópico é realizada uma comparação entre os onze estudos levantados. O escopo da análise de variabilidade é a investigação metodológica e não numérica. A variabilidade de dados será investigada junto aos resultados, no Capítulo 4. Considera-se relevante para esta análise os seguintes itens: país de origem, software, unidades, fronteiras da análise, categorias de impactos ambientais e os produtos avaliados (Quadro 4).

O primeiro item é o país de origem da análise, pois a representatividade tecnológica e geográfica do processo de produção dos materiais são elementos significantes (TAKANO et al., 2014). Países com tradição na utilização da madeira, possuem processos operacionais mais eficientes, por outro lado, países com extensas áreas de florestas reduzem os impactos ambientais associados ao transporte de matéria-prima. A composição da matriz energética local também gera influência nas emissões de gases poluentes. A representatividade local contribui para análises que combinam dados de processo com dados de base econômica.

A utilização de *softwares* na condução das análises geram variabilidades de dados, causadas pela utilização de diferentes protocolos, base de dados e categorias de impactos ambientais. O *SimaPro* segue as normas ISO 14040, utilizando a base de dados do Ecoinvent e as categorias de impactos ambientais do SETAC. Na maior parte das ACVs, o método descrito pela norma ISO 14040 é adotado, no entanto, alguns autores não fazem

referencia à norma claramente. Percebe-se a utilização de protocolo através dos *softwares* ou da estrutura metodológica da análise.

As unidades que os autores optaram por relatar nas suas conclusões são relevantes em um processo comparativo, especialmente quando se trata de materiais com diferentes densidades. A maior parte dos estudos utilizam o m³ como unidade para a madeira. Os estudos que adotam o kg, relatam a densidade aplicada para o balanço de massas. As unidade de energia são expressas em MJ e as emissões em kg.

Os limites das análise devem ser expressos claramente no método, já que a inclusão ou exclusão de etapas do ciclo de vida do produto inviabilizam a comparabilidade entre resultados. Os cálculos de transporte também devem ser reportados, pois as distâncias percorridas e o tipo de combustível utilizado podem gerar diferenças significativas nos resultados. Os resultados expressos separadamente, por etapa do ciclo de vida, viabilizam a comparação entre estudos com escopos distintos.

Com base nos estudos analisados, pode-se afirmar que a demanda energética e a emissão de CO₂ têm maior representatividades nos estudos de ACV. Outras categorias de impacto ambientais são investigadas, no entanto, percebe-se que a categoria de impacto GWP é o foco da maior parte das análises. Nas cinco análise voltadas exclusivamente para produtos de madeira nota-se a inclusão de categorias de impactos que quantificam as emissões para água e solo.

É evidente, a partir da comparação, que há um consenso sobre os seguintes itens: unidade, limites da análise e categorias de impacto. É perceptível uma tendência ao uso da ferramenta *SimaPro* e, conseqüentemente, do protocolo descrito pela ISO14040. Nota-se que as ACVs em produtos de madeira estão limitadas a analisar os processos industriais da manufatura de produtos de base florestal, no entanto, recomenda-se a avaliação do ciclo de vida completo dos produtos, uma vez que a madeira possui um alto potencial para reuso. Os métodos de determinação de CO₂ embutido em produtos de madeira que consideram o estoque de carbono na madeira e a fixação de carbono realizado pelas árvores ainda são pouco explorados.

Quadro 4: Variabilidade entre os estudos

Estudo	País	Software	Método	Unidade	Limites da ACV	Categoria de Impacto	Materiais de construção de madeira
Brown, Hamel e Hedman	Estados Unidos	---	Análise de processos	Btu lbs	<i>Gate-to-gate</i>	Demanda de energia primária	Madeira serrada, <i>fiberboard</i> , aço, alumínio, cal, concreto, gesso, lâ mineral, tijolo e vidro
Brand	Brasil	---	---	kWh/t	<i>Cradle-to-gate</i>	Demanda de energia primária	Madeira serrada e compensados
Puettmann e Wilson	Estados Unidos	SimaPro v5	ISO 14040	MJ/m ³ kgCO ₂ /m ³	<i>Cradle-to-gate</i>	Demanda de energia primária, emissões para o ar, água e solo	Madeira serrada, verde, MLC, compensado, painel estrutural e OSB
Alcorn	Nova Zelândia	---	---	MJ/kg MJ/m ³ gCO ₂ /kg	<i>Cradle-to-gate</i>	Demanda de energia primária e GWP	Produtos derivados de madeira
Bribian et al.	Espanha	SimaPro v7.1.8	ISO 14040 / 14044	MJ/kg kgCo ₂ /kg	<i>Cradle-to-gate</i>	Demanda de energia primária, demanda de água e GWP	Madeira serrada, MLC, MDF e OSB
Hammond e Jones	Inglaterra	---	---	MJ/kg kgCo ₂ /kg	Variados	Demanda de energia primária e GWP	Variados
May et al.	Austrália	SimaPro v7.1.8	ISO 14040	MJ/m ³	<i>Cradle-to-gate</i>	Demanda de energia primária, demanda de água e recursos naturais	Madeira serrada, Polpa de madeira, partículas e outros
Puettmann et al.	Estados Unidos	SimaPro v4	TRACI 2.0	MJ/m ³ kgCo ₂ /m ³	<i>Cradle-to-gate</i>	Demanda de energia primária, GWP, acidificação, eutrofização, depreciação da camada de ozônio e poluição.	OSB
Souza	Brasil	---	---	MJ/kg	---	Demanda de energia	---
Murphy, Devlin e McDonnell	Irlanda	---	ISO 14040	MJ/m ³ kgCo ₂ /m ³	<i>Cradle-to-gate</i>	Demanda de energia primária e GWP	Madeira serrada, pellet, MDF e OSB
Oliveira et al.	Brasil	---	---	MJ/m ² kgCo ₂ /m ²	---	Demanda de energia primária e GWP	---

3.3. CONCLUSÃO DO ESTADO DA ARTE

Conclui-se o que estado da arte é determinante para o desenvolvimento da pesquisa e delimitação das análises. Através do relatório *Energy Analysis of 108 Industrial Process* (BROWN, HAMEL E HEDMAN, 1996) é possível alcançar o objetivo específico de quantificar a EElétrica e a ETérmica requisitada para a extração da madeira e produção dos materiais de construção. A discriminação do consumo energético, em suas fontes específicas, é realizada a partir dos dados obtidos no relatório.

Reconhece-se que a coleta de dados é realizada a partir de uma única fonte, e que, tanto os processos industriais, quanto as entradas de energia, sofrem variações. Admite-se que este fato pode ser interpretados como uma fragilidade nos resultados de EE e CO₂Embutido e, por este motivo, é realizado um comparativo com dados de estudos anteriores. O levantamento de dados locais seria uma forma de validar os dados do relatório, sob os aspectos da realidade nacional do processo de exploração da madeira e fabricação dos materiais de construção. No entanto, a condução de uma ACV completa está fora do escopo da dissertação e pode ser tema de trabalhos futuros.

Apoiado neste capítulo são estabelecidos parte dos cenários de avaliação dos padrões construtivos do sistema *wood frame*. Os estudos levantados também fornecem as bases necessárias para a investigação da variabilidade de resultados (Capítulo 4). Embora os estudos demonstrem resultados referentes à realidade internacional, a falta de bases de dados nacionais faz com que a utilização de dados estrangeiros seja recorrente em estudos brasileiros (MONICH, 2012; TAVARES, 2014; OLIVEIRA et al., 2015). A convergência com a linha de pesquisa da dissertação e os critérios de transparência em relação ao método também foram fatores limitadores para a seleção dos trabalhos revisados.

4. EE E CO₂ EMBUTIDO NOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

O método desta pesquisa está estruturado nos princípios e requisitos metodológicos fornecidos pela NBR ISO 14040:2001, com detalhes relativos ao método retirados da norma complementar: ISO 14044:2006.

4.1. OBJETIVO E ESCOPO

O objetivo deste estudo é quantificar a EE e CO₂ Embutido nos materiais de construção do sistema *wood frame* através da análise de processos produtivos. As análises tratam do processo de produção dos materiais como uma operação organizada em entradas e saídas. Calcula-se as entradas de matéria-prima e energia, as saídas de produto e a emissão de gás carbônico associadas aos insumos energéticos.

Nesta dissertação, são quantificados os requisitos energéticos e as emissões de gás carbônico na extração da matéria-prima e produção da *fiberboard* e da madeira serrada. Os mesmos procedimentos metodológicos são aplicados para determinar a EE e o CO₂ Embutido em outros materiais de construção. Os cálculos referentes ao aço, alumínio, cal, concreto, gesso, lã mineral, tijolo e vidro estão disponíveis no Apêndice A.

O escopo das análises está em identificar as entradas de EElétrica - Energia Elétrica e ETérmica - Energia Térmica no processo de fabricação de materiais de construção do sistema *wood frame* e quantificar a emissão de CO₂ para os requisitos energéticos. A unidade funcional de EE é Megajoules – MJ por Quilograma – kg e de CO₂ Embutido é kg de CO₂ por kg de material.

As análises começam com o levantamento dos dados prontamente disponíveis. Os fluxogramas de processo e as entradas e saídas de EElétrica e ETérmica são extraídos do relatório *Energy Analysis of 108 Industrial Process*, de Brown, Hamel e Hedman (1996). Os fatores de emissão de CO₂ para a EElétrica são estimado a partir do método de Tavares (2006), com os dados do BEN (2015). Para a ETérmica consideram-se todos os tipos de combustíveis e os dados são retirados do relatório do IPCC (2006).

Este estudo limita-se a quantificar a EE e o CO₂ Embutido nos produtos em madeira através de uma abordagem *cradle-to-gate*. A análise dos demais materiais de construção (Apêndice A) possuem uma abordagem *gate-to-gate*, ou seja, dentro dos limites da fábrica. As saídas de CO₂ e demais gases não são quantificadas, apenas as emissões de CO₂ oriundas da geração de EElétrica e ETérmica.

Nesta pesquisa, assume-se que o limite da análise está em explicar as entradas e saídas de EElétrica, ETérmica e CO₂ presentes nos processo industriais dos produtos de madeira. Os demais aspectos associados às etapas dos sistemas produtivos não são fortemente explorados, portanto a sua investigação está fora do escopo da análise. Na Figura 13 ilustra-se o limite de exploração da pesquisa.

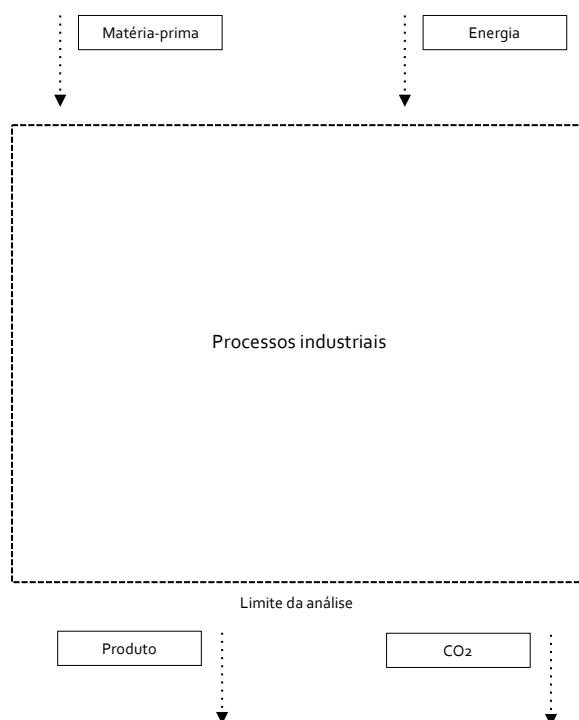


Figura 13: Limite da exploração da pesquisa
Fonte: Autora (2016)

Na análise do processo de fabricação da madeira serrada e da *fiberboard* não considera-se nenhum componente de transporte além daqueles associados ao processo de exploração florestal. Nestas análise, também são excluídos os requisitos energéticos para obtenção dos bens de capital. Dentro do sistema de níveis proposto pelo *International Federation of Institutes for Advanced Study* – IFIAS os Requisitos Totais de Energia – RTE contabilizados nas análises energéticas desta dissertação são classificados em nível 2. Este, agrega a energia direta para extração e obtenção de matérias-primas e os requisitos de energia primária dos processos realizados dentro dos limites da fábrica. Em conjunto com o nível 1, o segundo nível representa 90% dos RTE analisados no processo (TAVARES, 2006).

4.2. ANÁLISE DO INVENTÁRIO

A análise do inventário envolve a coleta de dados e os procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas de energia e as emissões de CO₂. Neste capítulo são detalhados os procedimentos metodológico para o cálculo de EE e CO₂ Embutido nos produtos de madeira: *fiberboard* e madeira serrada.

As entradas e saídas de energia foram obtidas através do relatório de Brown, Hamel e Hedman (1996). Assume-se que os processo industriais variam conforme as condições tecnológicas locais, no entanto este relatório apresenta uma estrutura básica para o entendimento do processo de produção. O fluxograma proporciona uma abordagem relativamente simples que permite substituir tecnologias ou etapas do processo atual.

Sabe-se que nos padrões construtivos do sistema *wood frame* utiliza-se placas de OSB para estrutura e vedação das edificações. No entanto, devido a indisponibilidade de dados energéticos do processo industrial do painel OSB, assume-se, nesta pesquisa, o fluxograma industrial da *fiberboard*. Embora a *fiberboard* não seja um produto engenheirado e não apresente características estruturais como o OSB, ambos os materiais são classificados como painéis compostos de madeira e apresentam processos industriais semelhantes. Através da Figura 14 observa-se o fluxograma industrial do OSB.

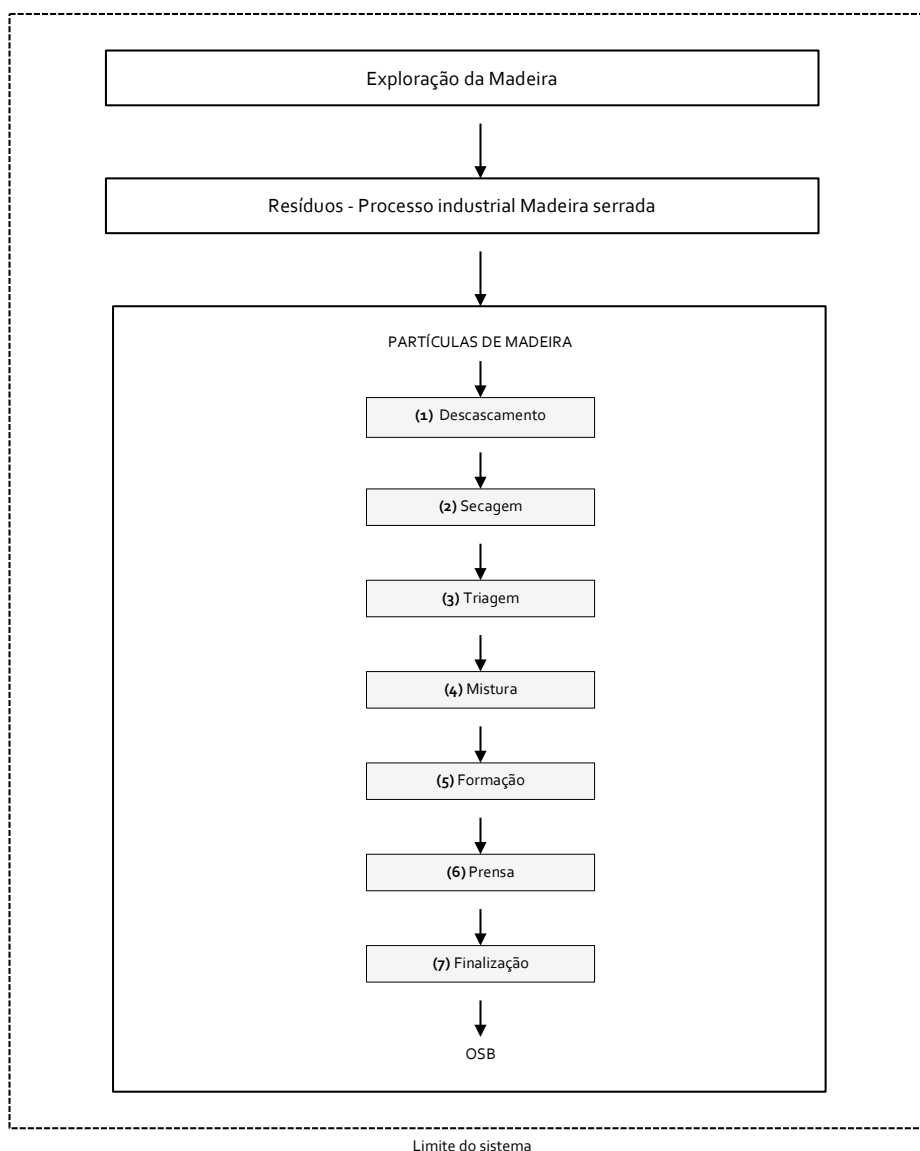


Figura 14: Fluxo industrial do OSB
Fonte: Adaptado de Kaestner (2015)

A manufatura da madeira serrada envolve a geração de resíduos utilizados como matéria-prima para a fabricação da *fiberboard* e demais painéis engenheiradas. Estima-se uma perda de massa de 21,5% em forma de resíduos (BROWN, HAMEL e HEDMAN, 1996). Os resíduos oriundos das etapas de descascamento, serragem, corte e aparo das toras são triturados e transformados em partículas de madeira, um subproduto da fabricação da madeira serrada. O método utilizado para de terminar a EE e CO₂ Embutido nos produtos de madeira é apresentado detalhadamente nos tópicos a seguir. O fluxograma ilustrado pela Figura 15 expõe os limites da análise e a correlação entre os processo industriais da madeira serrada e da *fiberboard*.

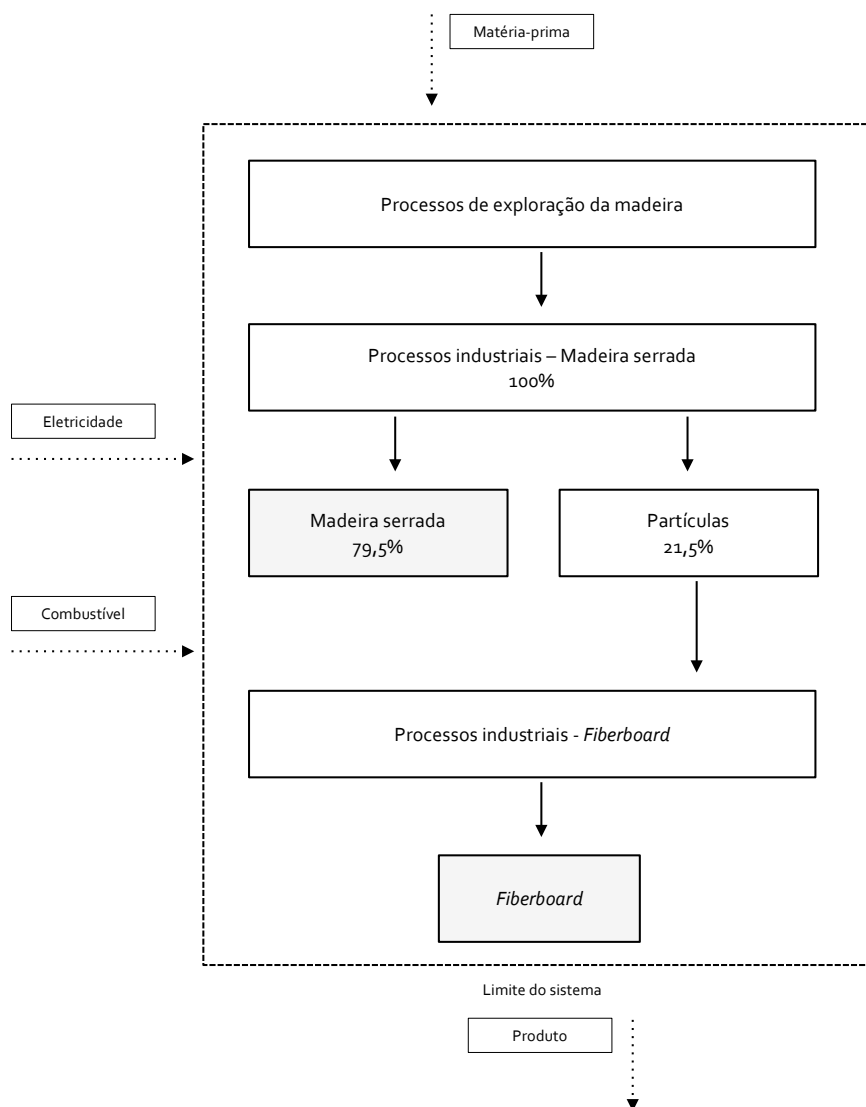


Figura 15: Limites da análise
 Fonte: Adaptado de *Brown, Hamel e Hedman* (1996)

4.2.1. Exploração da madeira

O processo de exploração da madeira é referente à extração e transporte da matéria-prima e envolve a derrubada da árvore, corte e aparo e transporte das toras até a serraria. Este é uma etapa comum ao processo industrial de da madeira serrada e da *fiberboard*. As entradas de EElétrica e ETérmica no processo de exploração da madeira são ilustradas através da Figura 16.

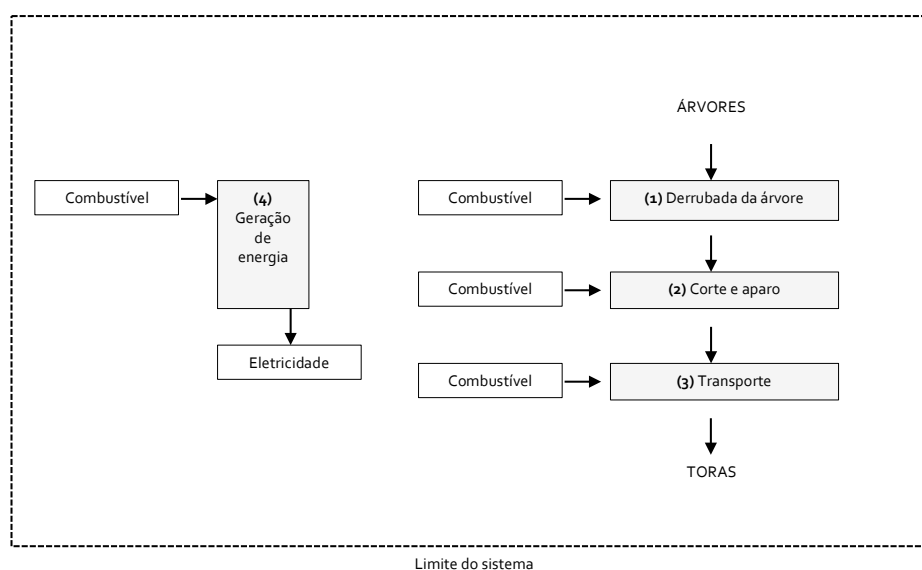


Figura 16: Fluxo energético no processo de exploração da madeira
Fonte: Adaptado de *Brown, Hamel e Hedman* (1996)

Para quantificar os requisitos energéticos no processo de exploração de 1kg de madeira calcula-se a entrada de EElétrica e ETérmica separadamente. Neste sistema assume-se que 19,49MJ de EElétrica são gerados dentro dos limites da fábrica a partir de um gerador que requisita 58,49 MJ de combustível fóssil (BROWN, HAMEL e HEDMAN, 1996). O total de EElétrica requisitada para a exploração de 1kg de madeira é de 38,98 MJ, sendo 50% provenientes da rede de distribuição de energia elétrica (BROWN, HAMEL e HEDMAN, 1996). Na Tabela 19 Ilustra-se os cálculos de EE processo de exploração da madeira.

Tabela 19: Cálculo de Energia Embutida no processo de exploração da madeira

Etapa	Entrada EElétrica (MJ/kg)	Saída EElétrica (MJ/kg)	Entrada ETérmica (MJ/kg)	EE (MJ/kg)
(1) Derrubada da árvore	15,594	---	487,810	
(2) Corte e aparo	23,386	---	171,578	
(3) Transporte	---	---	318,238	
(4) Geração de energia	---	19,490	58,494	
	19,49		1036,12	1055,61

Fonte: Adaptado de *Brown, Hamel e Hedman* (1996)

4.2.2. Madeira serrada

Os processos industriais para a manufatura da madeira serrada são precedidos pelos processos de exploração da madeira, apresentados no item anterior. Sendo assim, os requisitos energéticos necessários para a fabricação de 1kg de madeira serrada incluem 79,5% da energia requisitada nas operações florestais (BROWN, HAMEL e HEDMAN, 1996). A EE no processo industrial de fabricação da madeira serrada inclui oito etapas. Através da Figura 17 ilustra-se as fronteiras do sistema e as entradas de EE elétrica e ETérmica na produção da madeira serrada.

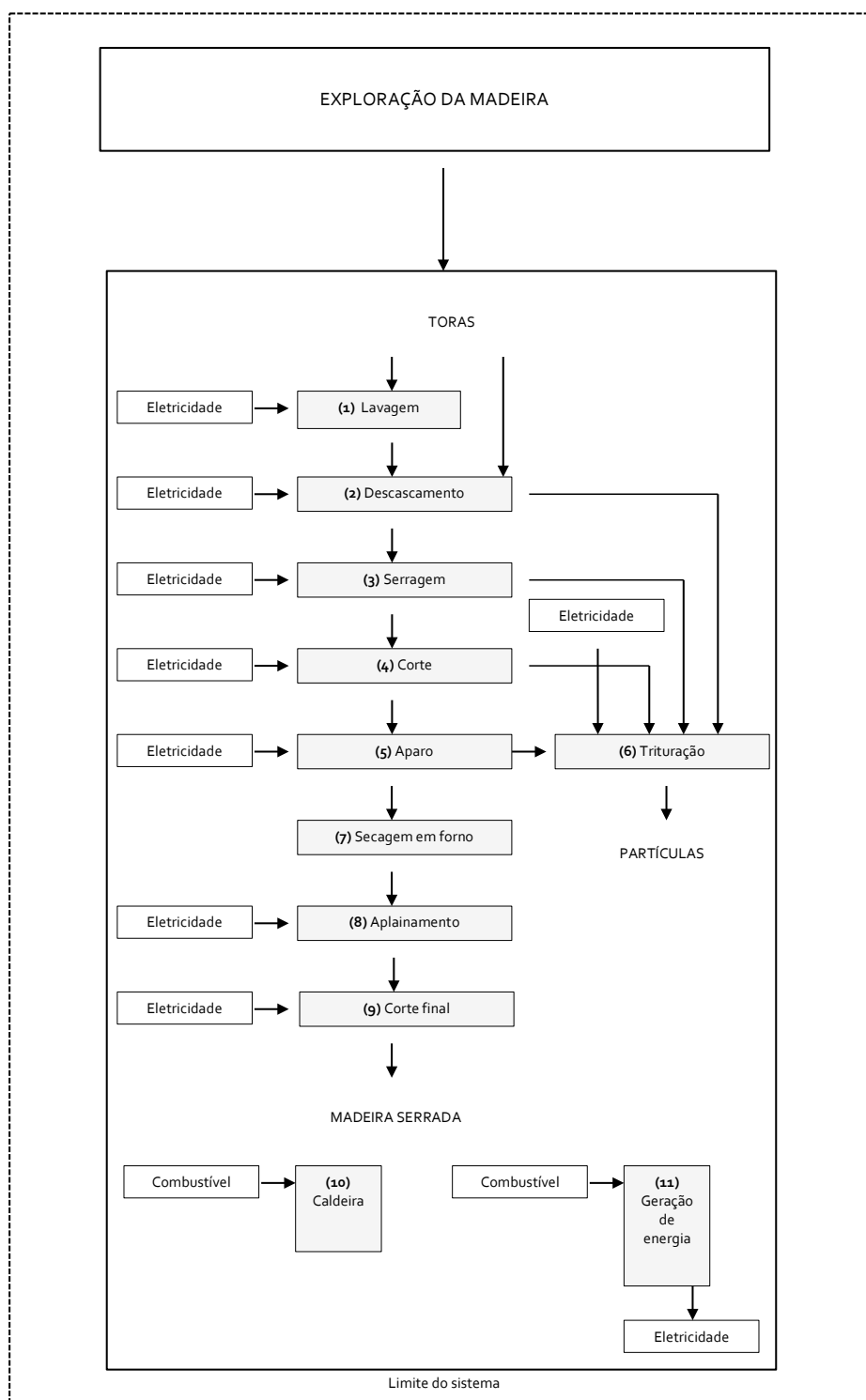


Figura 17: Fluxo energético na produção da madeira serrada
 Fonte: Adaptado de *Brown, Hamel e Hedman* (1996)

As etapas de descascamento, serragem, corte e aparo geram uma perda de massa, em forma de resíduos, de 21,5% (BROWN, HAMEL e HEDMAN, 1996). Estes resíduos são triturados e reutilizados como matéria-prima no processo de fabricação da *fiberboard*. Desta

forma parte da energia requisitada nestas etapas é atribuída à fabricação da *fiberboard*. O processo de trituração é desconsiderado do cálculo de EE na madeira serrada, atribuído à *fiberboard*. Na Tabela 20 são discriminados os requisitos energéticos atribuídos à fabricação da madeira serrada e da *fiberboard*. Através Tabela 20 ilustra-se os requisitos de EE elétrica e ETérmica nos processos industriais de fabricação da madeira serrada. Na Tabela 21 é apresentado o total de EE em 1 kg do produto excluindo as operações florestais.

Tabela 20: Requisitos energéticos para a fabricação da madeira serrada e da *fiberboard*.

Etapa	Entrada EE elétrica (MJ/kg)	Perda de Massa (%)	EE elétrica <i>fiberboard</i> (MJ/kg)	EE elétrica madeira serrada (MJ/kg)
(2) Descascamento	0,105	13	0,013	0,092
(3) Serragem	0,262	3,75	0,009	0,253
(4) Corte	0,105	2,34	0,002	0,103
(5) Aparo	0,126	2,4	0,003	0,123
(6) Trituração	0,158	---	0,158	---

Fonte: Adaptado de Brown, Hamel e Hedman (1996)

Tabela 21: Cálculo de Energia Embutida no processo industrial da madeira serrada

Etapa	Entrada EE elétrica (MJ/kg)	Saída EE elétrica (MJ/kg)	Entrada ETérmica (MJ/kg)	EE (MJ/kg)
(1) Lavagem	0,063	---	---	
(2) Descascamento	0,092	---	---	
(3) Serragem	0,253	---	---	
(4) Corte	0,103	---	---	
(5) Aparo	0,123	---	---	
(6) Trituração	---	---	---	
(7) Secagem em forno	---	---	---	
(8) Aplainamento	0,262	---	---	
(9) Corte final	0,126	---	---	
(10) Caldeira	---	---	5,226	
(11) Geração de energia	---	0,072	0,220	
		0,950	5,446	6,396

Fonte: Adaptado de Brown, Hamel e Hedman (1996)

Os requisitos energéticos necessários para a fabricação de 1kg de madeira serrada incluem a exploração da madeira e os processos industriais. Conforme o relatório de Brown, Hamel e Hedman (1996), assume-se que 79,5% dos requisitos energéticos necessários para as operações florestais são atribuídos aos cálculos de EE na madeira serrada, enquanto 21,5% são contabilizados nos cálculos de EE na *fiberboard*. A EE Total da madeira serrada é ilustrada na Tabela 22.

Tabela 22: EE Total na madeira serrada

EE no processo de exploração da madeira (MJ/kg)	839,20
EE no processo industrial da madeira serrada (MJ/kg)	6,396
EE Total (MJ/kg)	845,60

4.2.3. *Fiberboard*

O processo de manufatura da *fiberboard* inclui parte da EE na exploração da madeira e em quatro etapas do processo industrial da madeira serrada (BROWN, HAMEL e HEDMAN, 1996). Isso se deve ao fato de que estes processos geram quantidades de resíduos que são trituradas e reutilizadas para a fabricação dos produtos engenheirados, como a *fiberboard*. As fronteiras do sistema e as entradas de EE elétrica e ETérmica na produção da *fiberboard* são ilustrados pelo fluxograma da Figura 18.

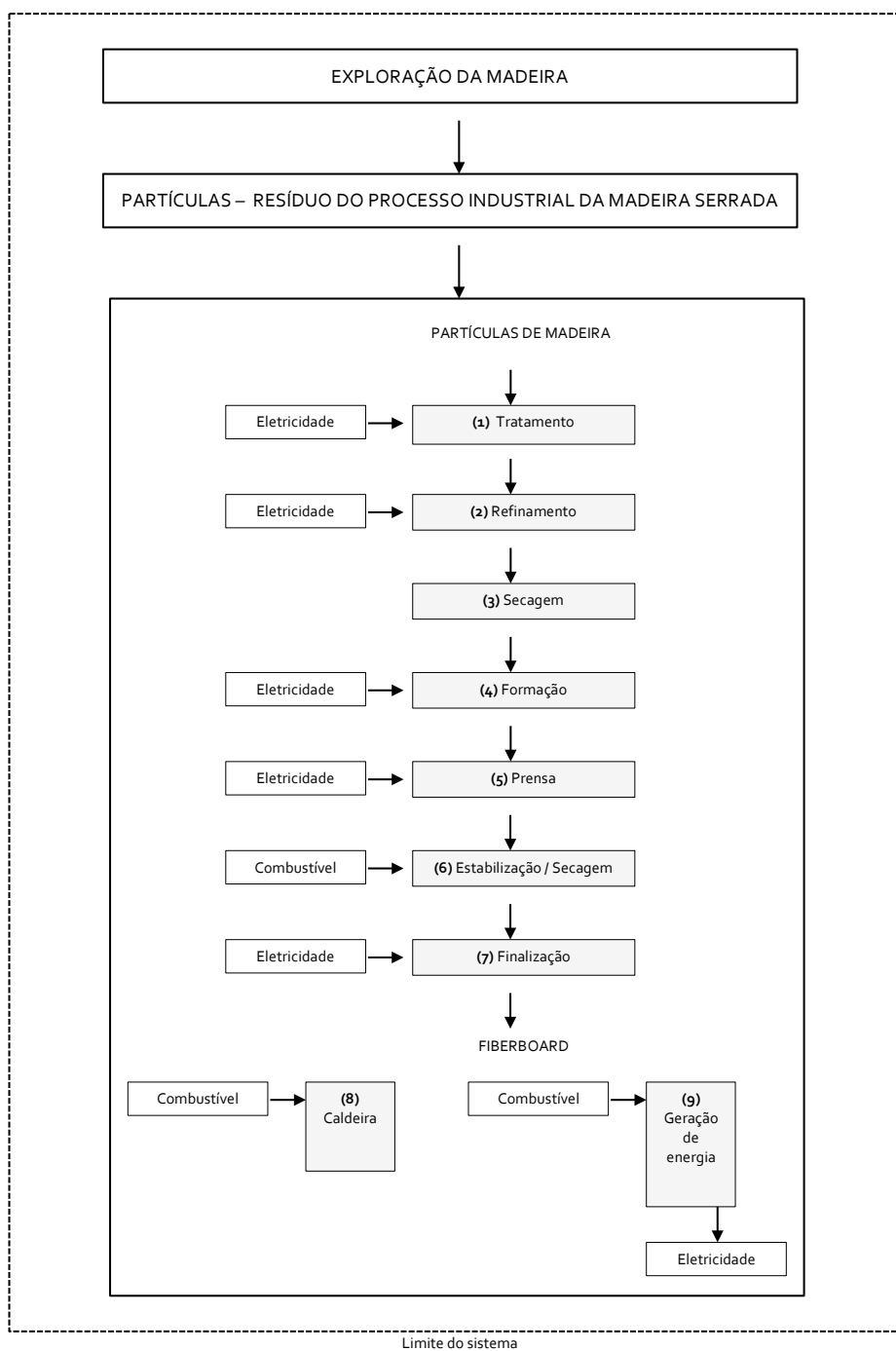


Figura 18: Fluxo energético na produção da *fiberboard*
 Fonte Adaptado de Brown, Hamel e Hedman (1996)

Na Tabela 23 são apresentados os requisitos energéticos do processo de manufatura da madeira serrada atribuídos à fabricação da *fiberboard* devido a reutilização de resíduos como matéria-prima. Na Tabela 24 ilustra-se os requisitos de EElétrica e ETérmica nos processos industriais de fabricação da *fiberboard*. Na Tabela 25 é apresentado o total de EE em 1 kg do produto.

Tabela 23: Cálculo de Energia Embutida na produção de resíduos

Etapas	EE elétrica nos resíduos do processo de manufatura da madeira serrada (MJ/kg)	EE Total nos resíduos do processo de manufatura da madeira serrada (MJ/kg)
(2) Descascamento	0,013	0,185
(3) Serragem	0,009	
(4) Corte	0,002	
(5) Aparo	0,003	
(6) Trituração	0,158	

Fonte Adaptado de *Brown, Hamel e Hedman* (1996)

Tabela 24: Cálculo de Energia Embutida no processo industrial da *fiberboard*

Etapas	Entrada EE elétrica (MJ/kg)	Saída EE elétrica (MJ/kg)	Entrada ETérmica (MJ/kg)	EE (MJ/kg)
(1) Tratamento	0,168	---	---	
(2) Refinamento	1,900	---	---	
(3) Secagem	---	---	---	
(4) Formação	2,006	---	---	
(5) Prensa	1,054	---	---	
(6) Estabilização / Secagem	---	---	1,054	
(7) Finalização	0,474	---	---	
(8) Caldeira	---	---	20,272	
(10) Geração de energia	---	0,158	0,474	
	5,44		21,8	27,24

Fonte Adaptado de *Brown, Hamel e Hedman* (1996)

Tabela 25: Cálculo de EE Total na *fiberboard*

EE no processo de exploração da madeira (MJ/kg)	216,41
EE no processo industrial da madeira serrada - resíduos (MJ/kg)	0,185
EE no processo industrial - <i>fiberboard</i> (MJ/kg)	27,24
EE Total (MJ/kg)	243,83

4.3. AVALIAÇÃO DE IMPACTO

Para a avaliação de impacto optou-se pela categoria mudanças climáticas, a qual está relacionada com a emissão de GEE – Gases de Efeito Estufa na atmosfera. Este modelo de caracterização de impacto ambiental foi desenvolvido pelo IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Os fatores de caracterização são expressos em GWP – *Global Warming Potential*. A unidade de caracterização é kgCO₂eq. O fator de emissão de CO₂ da EElétrica é estimado a partir do método de Tavares (2006) com os dados do BEN (2015). Para o quantitativo de CO₂ associado à ETérmica considera-se todos os tipos de combustíveis e, os dados são retirados do IPCC (2006). Através da Tabela 26 é ilustrado como a eletricidade foi estimada e na Tabela 27 apresenta-se as emissões de CO₂ por combustível.

Tabela 26: Base de dados para estimativa de eletricidade

Termoelétrica	Matriz brasileira %	Eficiência	Fator	%	kgCO ₂ /GJ (fonte)	kg CO ₂ /GJ (eletricidade)
Carvão	3,2	0,2	5,0	16,0	94,6	15,1
Óleo	6,8	0,3	3,3	22,7	74,1	16,8
Gás Natural	13,0	0,7	1,4	18,6	56,1	10,4
						42,3

Fonte: Adaptado de Tavares (2006) com dados do BEN (2015) e IPCC (2006)

Tabela 27: Geração de CO₂ por tipo de fonte energética

Fonte	CO ₂ (kg/MJ)
Eletricidade ¹	0,0423
Óleo combustível	0,0741
Gás natural	0,0561
GLP	0,0631
Outros secundários de petróleo	0,0733
Coque de carvão	0,0946
Coque de petróleo	0,0975
Carvão mineral ²	0,0915
Carvão vegetal ²	0,0510
Lenha	0,106
Biomassa	0,1000

Fonte: IPCC (2006)

(1) A Tabela 2 ilustra o cálculo da eletricidade; (2) IPCC (1996)

4.3.1. Exploração da madeira

A estimativa de emissão de CO₂ para EElétrica está ilustrada através da Tabela 28. Para a ETérmica optou-se por estimar as emissões de CO₂ para todos os combustíveis com o objetivo de obter um comparativo, demonstrados através da Tabela 29.

Tabela 28: Emissões de CO₂ para a EElétrica no processo de exploração da madeira

Fonte	Geração de CO ₂ por fonte energética (kgCO ₂ /MJ)	EElétrica (MJ/kg)	CO ₂ Embutido (kg CO ₂ /kg)
Eletricidade	0,0423	19,49	0,82

Tabela 29: Emissões de CO₂ para a ETérmica no processo de exploração da madeira

Fonte	Geração de CO ₂ por fonte energética (kgCO ₂ /MJ)	ETérmica (MJ/kg)	CO ₂ Embutido (kg CO ₂ /kg)
Óleo combustível	0,0741	1036,12	76,77
Gás natural	0,0561		58,12
GLP	0,0631		65,37
Outros secundários de petróleo	0,0733		75,94
Coque de carvão	0,0946		98,01
Coque de petróleo	0,0975		101,02
Carvão mineral	0,0915		94,80
Carvão vegetal	0,0510		52,84
Lenha	0,106		109,82
Biomassa	0,100		103,61

Para as estimativas de CO₂ Embutido na ETérmica (Tabela 30) considera-se o carvão mineral como combustível para todos os materiais estudados. O carvão mineral é o terceiro combustível mais consumido no setor industrial brasileiro, representa 13,5% do consumo energético total da indústria (BEN, 2015).

Tabela 30: CO₂ Embutido total no processo de exploração da madeira

CO ₂ Embutido EElétrica (kgCO ₂ /kg)	CO ₂ Embutido ETérmica (kgCO ₂ /kg)	CO ₂ Embutido Total (kgCO ₂ /kg)
0,82	94,80	95,62

O total de CO₂ Embutido para a exploração de 1kg de madeira é a soma do CO₂ Embutido na EElétrica e ETérmica, totalizando em 95,62 kg de CO₂ por kg de madeira.

4.3.2. Madeira serrada

A estimativa de emissão de CO₂ para EElétrica e ETérmica no processo industrial da madeira serrada estão ilustradas através das Tabelas 31 e 32.

Tabela 31: Emissões de CO₂ para a EElétrica no processo industrial da madeira serrada

Fonte	Geração de CO ₂ por fonte energética (kgCO ₂ /MJ)	EElétrica (MJ/kg)	CO ₂ Embutido (kg CO ₂ /kg)
Eletricidade	0,0423	0,95	0,04

Tabela 32: Emissões de CO₂ para a ETérmica no processo industrial da madeira serrada

Fonte	Geração de CO ₂ por fonte energética (kgCO ₂ /MJ)	ETérmica (MJ/kg)	CO ₂ Embutido (kg CO ₂ /kg)
Óleo combustível	0,0741	5,446	
Gás natural	0,0561		
GLP	0,0631		
Outros secundários de petróleo	0,0733		
Coque de carvão	0,0946		
Coque de petróleo	0,0975		
Carvão mineral	0,0915		0,498
Carvão vegetal	0,0510		
Lenha	0,106		
Biomassa	0,100		

O quantitativo de CO₂ Embutido na fabricação de 1kg de madeira serrada é a soma do CO₂ Embutido na EElétrica e ETérmica, totalizando em 0,538 kg de CO₂ por kg de madeira. Ao incluir 79,5% do CO₂ Embutido no processo de exploração da madeira o total das emissões de CO₂ somam 76,55 kg de CO₂ por kg de madeira serrada, conforme apresentado nas Tabelas 33 e 34.

Tabela 33: CO₂ Embutido total no processo industrial da madeira serrada

CO ₂ Embutido EElétrica (kgCO ₂ /kg)	CO ₂ Embutido ETérmica (kgCO ₂ /kg)	CO ₂ Embutido Total (kgCO ₂ /kg)
0,04	0,498	0,538

Tabela 34: Emissões de CO₂ no processo industrial da madeira serrada incluindo os processos de exploração da madeira

CO ₂ Embutido no processo de exploração da madeira (kgCO ₂ /kg)	76,01
CO ₂ Embutido no processo industrial da madeira serrada (kgCO ₂ /kg)	0,538
CO₂ Embutido Total (kgCO₂/kg)	76,55

4.3.3. Fiberboard

A estimativa de emissão de CO₂ para EElétrica na produção de resíduos e no processo industrial da *fiberboard* estão ilustradas nas Tabelas 35 e 36.

Tabela 35: Emissões de CO₂ para a EElétrica na produção de resíduos

Fonte	Geração de CO ₂ por fonte energética (kgCO ₂ /MJ)	EElétrica (MJ/kg)	CO ₂ Embutido (kg CO ₂ /kg)
Eletricidade	0,0423	0,185	0,078

Tabela 36: Emissões de CO₂ para a EElétrica no processo industrial da *fiberboard*

Fonte	Geração de CO ₂ por fonte energética (kgCO ₂ /MJ)	EElétrica (MJ/kg)	CO ₂ Embutido (kg CO ₂ /kg)
Eletricidade	0,0423	5,44	0,230

A estimativa de emissão de CO₂ para a ETérmica estão ilustradas através das Tabela 37. Os processos industriais que dão origem aos resíduos não têm entradas de ETérmica.

Tabela 37: Emissões de CO₂ para a ETérmica no processo industrial da *fiberboard*

Fonte	Geração de CO ₂ por fonte energética (kgCO ₂ /MJ)	ETérmica (MJ/kg)	CO ₂ Embutido (kg CO ₂ /kg)
Óleo combustível	0,0741	21,8	
Gás natural	0,0561		
GLP	0,0631		
Outros secundários de petróleo	0,0733		
Coque de carvão	0,0946		
Coque de petróleo	0,0975		
Carvão mineral	0,0915		1,99
Carvão vegetal	0,0510		
Lenha	0,106		
Biomassa	0,100		

O quantitativo de CO₂ Embutido na fabricação de 1kg de *fiberboard* é a soma do CO₂ Embutido na EElétrica e ETérmica, totalizando em 2,22kg de CO₂ por kg de *fiberboard*, conforme representado pela Tabela 38.

Tabela 38: CO₂ Embutido total no processo industrial da *fiberboard*

CO ₂ Embutido EElétrica (kgCO ₂ /kg)	CO ₂ Embutido ETérmica (kgCO ₂ /kg)	CO ₂ Embutido Total (kgCO ₂ /kg)
0,230	1,99	2,22

Ao incluir o CO₂ Embutido na produção dos resíduos provenientes do processo da fabricação da madeira serrada, as emissões de CO₂ somam 2,23 kg de CO₂ por kg de *fiberboard*. Adicionando 21.5% das emissões de gás carbônico oriundas da exploração da madeira, o CO₂ Embutido totaliza 22,85 kg de CO₂ por kg de produto. Através da Tabela 39 é representada a composição das emissões de CO₂ associadas à fabricação da *fiberboard*.

Tabela 39: Emissões de CO₂ no processo industrial da *fiberboard* incluindo os processos de exploração da madeira e produção de resíduos

CO ₂ Embutido no processo de exploração da madeira (kgCO ₂ /kg)	20,55
CO ₂ Embutido no processo industrial da madeira serrada - resíduos (kgCO ₂ /kg)	0,078
CO ₂ Embutido no processo industrial - <i>fiberboard</i> (kgCO ₂ /kg)	2,22
CO₂ Embutido Total (kgCO₂/kg)	22,85

4.4. CO₂ ESTOCADO NOS PRODUTOS DE MADEIRA

Fundamentado pela teoria do carbono estocado em produtos de madeira, é possível estabelecer uma estratégia para minimizar as emissões de CO₂ associadas aos processos industriais de fabricação de produtos de madeira. Segundo Oliver *et al.* (2014) assume-se que estes produtos contêm 50% de carbono e, a partir da relação de 3,667 kg de CO₂ por kg de carbono pode-se estimar a fixação de CO₂. Desta forma, assume-se que 1kg de produto de madeira estoca 1,83 kg de CO₂. Através da Tabela 40 ilustra-se o quantitativo total de CO₂ Embutido nos processos industriais dos produtos de madeira considerando o estoque de carbono, excluindo as operações florestais.

Tabela 40: Cálculo de carbono estocado

Material	CO ₂ Embutido (kgCO ₂ /kg)	CO ₂ Estocado (kgCO ₂ /kg)	CO ₂ Embutido Total (kgCO ₂ /kg)
Madeira serrada	0,538	1,83	-1,29
Fiberboard	2,230	1,83	0,40

4.5. INTERPRETAÇÃO

Comparando os resultados obtidos nesta pesquisa com os levantados em estudos anteriores, percebe-se uma discrepância bastante significativa em relação aos processos de exploração florestal. Nos 8 estudos em 6 países diferentes levantados por May *et al.* (2012), a energia associada às operações florestais ficou entre 0,44 e 0,98 MJ/kg. Este resultado é convergente com os números obtidos por Murphy *et al.* (2015), que indicam que os insumos

de energia para as operações florestais representam de 3 à 4% dos requisitos energéticos totais atribuídos à fabricação da *fiberboard* e do painel OSB. O mesmo estudo confirma que as emissões de CO₂ associadas às operações florestais representam de 4 à 5% do total de CO₂ Embutido nesses produtos. É importante ressaltar que as emissões de gás carbônico estão associadas à composição da matriz energética local e que o estudo de Murphy et al. (2015) foi conduzido com base no cenário energético irlandês.

Na análise conduzida pelo presente estudo, a EE nas operações florestais representam de 88 à 99% dos insumos energéticos totais para a fabricação da madeira serrada e da *fiberboard*. As emissões de gás carbônico associadas às operações florestais, excluindo o estoque de carbono, possuem uma representatividade de 90 à 99%, em todo o processo de manufatura dos produtos. Certamente os dados coletados para o cálculo de EE no processo de exploração da madeira foram obtidos através de uma análise energética com tendência metodológica distinta.

Embora os dados sejam provenientes de uma mesma base de dados, a utilização do protocolo não garante a confiabilidade de dados. A diferença numérica entre bancos de dados são relevantes e podem ser originárias de adaptações metodológicas não mencionadas. Dessa forma, diferentes conjuntos de dados podem levar a conclusões variadas de uma mesma ACV. Portanto, recomenda-se a investigação da origem dos dados e transparência do método.

Reconhece-se que a confidencialidade das fontes de dados do relatório de Brown, Hamel e Hedman (1996) reduz a transparência da análise. Este problema poderia ser superado com a coleta de dados em uma indústria local. No entanto, observa-se que os dados oriundos da indústria de produtos de madeira também não fornecem detalhes e precisão suficientes para substituir os dados retirados da bibliografia. Mais uma vez, parte do problema da análise é que não há informação suficiente sobre estes processos no Brasil. Outros autores também confirmam a falta de disponibilidade de dados para análises energéticas de produtos de madeira no cenário internacional (ALCORN, 2010; HAMMOND e JONES, 2011).

Embora o estoque de carbono nos produtos de madeira ainda não seja reconhecido como uma forma eficiente de compensar as emissões de CO₂ pelo Protocolo de Quioto, o IPCC reconhece essa prática como uma diretriz para o alcance da sustentabilidade. Na presente análise, os cálculos de carbono estocado minimizaram o alto consumo de

ETérmica encontrado no processo de exploração florestal. O saldo final de CO₂ Embutido na madeira serrada foi negativo, enquanto da *fiberboard* ficou próximo de zero. Este resultado confirma o pressuposto de que o carbono estocado em produtos de madeira contribui positivamente no quantitativo de CO₂ Embutido nos materiais de construção.

Em conclusão, nota-se que esta análise precisa de mais dados locais e melhorias metodológicas antes que possa ser considerada uma fonte de dados válida no cenário nacional. Entretanto, os resultados desta pesquisa mostram-se suficiente para tirar conclusões preliminares sobre os impactos ambientais associados ao processo de manufatura da madeira serrada e da *fiberboard*. Acredita-se que os valores encontrados devem ser comparados com estudos anteriores, como será apresentado no tópico a seguir.

4.6. VARIABILIDADE

Segundo Takano et al. (2014), as razões para a variabilidade de resultados se justificam nos seguintes elementos: número de dados, método de ACV, representatividade técnica e geográfica da produção material, representatividade geográfica e temporal da produção de eletricidade, fronteira do sistema e diferentes definições de categoria de impacto. A comparação direta entre banco de dados é discutível, pois as análises são baseadas em diferentes métodos de cálculo, de acordo com o seu propósito.

Sabe-se que os processos industriais variam conforme o desenvolvimento tecnológico local. Nesta pesquisa, utilizou-se uma estrutura básica para o entendimento dos processos de produção dos produtos e do processo de exploração da madeira. No entanto, é possível afirmar que no cenário nacional estes procedimentos sofrem variações em função dos seguintes fatores: adaptação à matéria-prima local, atendimentos às normas técnicas que asseguram as propriedades físicas da madeira, demanda do mercado interno e viabilidade econômica.

Nesta pesquisa, os quantitativos de EE e CO₂Embutido no processo de exploração florestal apresentaram valores significativamente distantes dos demais estudos. Este fator influencia nos quantitativos finais de EE e, consequentemente, CO₂Embutido na madeira serrada e na *fiberboard*. Assume-se que estes valores não podem ser utilizados como uma base de dados confiável até que a origem dos dados seja profundamente explorada. O levantamento de dados locais seria uma forma de investigar a variabilidade.

Através das Tabelas 41 e 42 observa-se as diferenças entre os estudos e evidencia-se a variabilidade entre conjuntos de dados. Neste comparativo inclui-se os dados referentes ao processo industrial dos materiais. Optou-se por excluir as operações florestais e considerar tanto os resultados com o cálculo de estoque de carbono, como a exclusão deste. Esta foi um decisão tomada após a surpresa com os resultados das operações florestais e com base nos método utilizados nos demais estudos, os quais não incluem o balanço de carbono.

Tabela 41: Variabilidade de EE entre os estudos

Autor	EE Madeira serrada (MJ/kg)	EE <i>Fiberboard</i> (MJ/kg)	EE OSB (MJ/kg)
Neste estudo	6,39	27,42	---
Brand	4,10	9,14	---
Puettmann e Wilson	8,53	9,58	17,56
Alcorn	8,90	12,00	---
Bribián et al.	20,99	34,64	36,33
Hammond e Jones	10,40	11,00	15,00
Puettmann et al.	---	---	15,86
Souza	1,10	---	---
Murphy, Devlin e McDonnell	1,90	29,83	9,28

Tabela 42: Variabilidade de CO₂Embutido entre os estudos

Autor	CO₂ Embutido Madeira serrada (kgCO₂/kg)	CO₂ Embutido <i>Fiberboard</i> (kgCO₂/kg)	CO₂ Embutido <i>OSB</i> (kgCO₂/kg)
Neste estudo	0,538 / -1,29	2,230 / 0,40	---
Brand	---	---	---
Puettmann e Wilson	0,60	0,51	1,03
Alcorn	-0,001	-0,320	---
Bribián et al.	0,30	0,035	0,62
Hammond e Jones	---	---	---
Puettmann et al.	---	---	0,45
Souza	---	---	---
Murphy, Devlin e McDonnell	0,10	1,49	0,39

5. EE E CO₂ EMBUTIDO NO SISTEMA WOOD FRAME

Nesse capítulo será determinada a EE e o CO₂ Embutido em dois padrões do sistema *wood frame*. Devido à variabilidade de resultados de EE e o CO₂ Embutido encontrados através dos resultados desta pesquisa e em trabalhos anteriores optou-se por considerar cinco cenários para análise. Os primeiros três cenários são baseados nos dados obtidos no Capítulo 4; incluindo e excluindo as operações florestais e o balaço de carbono. O quarto e quinto cenários utilizam dados de estudos anteriores, levantados nos Capítulos 3. No tópico 5.8 é realizada uma análise quantitativa e metodológica dos resultados obtidos.

5.1. PADRÃO A

O padrão construtivo A foi extraído do trabalho de Oliveira et al. (2015) e segue os requisitos expostos na Diretriz SiNAT 005 (2011). O SiNAT é uma iniciativa da comunidade técnica brasileira para operacionalizar a avaliação de produtos inovadores na construção civil brasileira. Para que um produto inovador seja aprovado pelo SiNAT é necessário a apresentação de um DATec. O documento indica o atendimento do sistema às normas brasileiras e o cumprimento dos requisitos de desempenho. Atualmente, somente um DATec foi aprovado nacionalmente para o sistema *wood frame*, o DATec nº 020 (2013).

Conforme descrito no DATec nº 020 (2013), o padrão construtivo “sistema de vedação vertical leve em madeira” deve seguir as seguintes características: paredes externas com 135mm, paredes internas com 135mm ou 105mm e paredes de geminação com 185mm. As paredes com função estrutural são formadas por quadros estruturais em peças de madeira serradas autoclavadas. O fechamento da face externa das paredes de fachada é realizado em chapas de OSB revestidas com placa cimentícia com tratamento de juntas aparentes ou dissimuladas. O fechamento da face interna das paredes de fachada e de ambas as faces das paredes internas é executado em chapas de gesso acartonado para *drywall* aplicadas sobre chapas de OSB. As paredes de geminação possuem núcleo em manta de lã de vidro. A cobertura é constituída de estrutura metálica ou em madeira, com telhado em telhas cerâmicas, forro em régua de PVC e manta de lã de vidro posicionada sobre o forro. Na Figura 19 são ilustrados os componentes da parede em *wood frame* conforme preconizado no DATec nº 020 (2013), em atendimento à NBR 15575 (2013).

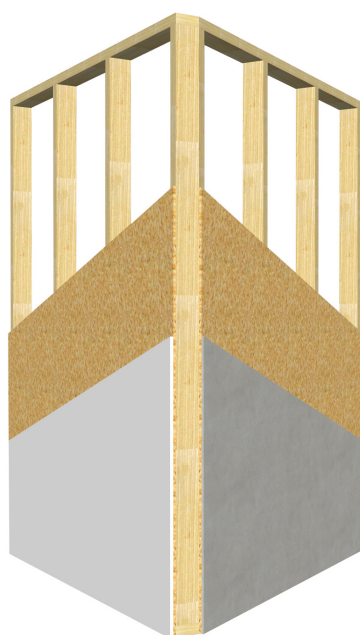


Figura 19: Composição das paredes internas e externas do padrão A
Fonte: Adaptado do Guia da Construção (2013)

Nesta pesquisa, calcula-se a EE e o CO₂Embutido no sistema de estrutura e vedação do padrão construtivo A, os demais componentes são excluídos da análise. Assume-se que as peças estruturais, de madeira maciça serrada e autoclavada, são proveniente de florestas plantadas com manejo sustentável. Considera-se a vedação com painéis OSB, revestidos com *drywall* (interno) e com chapa cimentícia (externo). O quantitativo de materiais para 1m² construído foi adaptado do exposto no DATec nº 020 (2013), com detalhes retirados de Guia da Construção (2013) e, encontra-se na Tabela 43.

Tabela 43: Quantitativo de material padrão A

Material	Peso (kg)
Drywall	26,0
Chapa cimentícia	18,5
OSB	29,3
Madeira estrutural	23,6

5.2. PADRÃO B

O padrão construtivo B foi retirado das dissertações de Espíndola (2010) e Souza (2013). O “sistema plataforma” é um sistema construtivo leve em madeira e foi desenvolvido com um sistema de construção modular. O sistema estrutural é formado por montantes e vigas

em madeira maciça e chapas estruturais. A ossatura estrutural em madeira é enrijecida por painéis OSB ou *fiberboard*, estas vedam a edificação externamente e fornecem estabilidade às paredes. Internamente, os montantes estruturais são vedados com *drywall*, conforme ilustrado pela Figura 20.

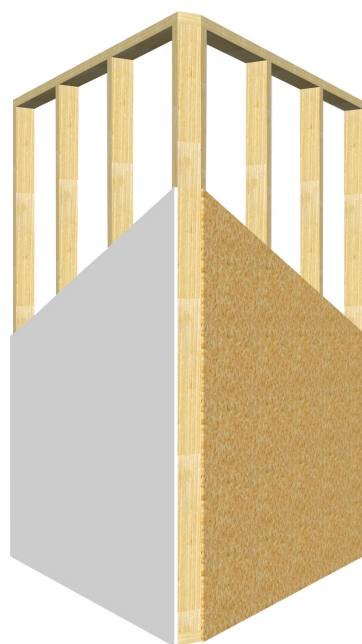


Figura 20: Composição das paredes internas e externas do padrão B
Fonte: Adaptado de Espíndola (2010)

Para estabelecer um comparativo, calcula-se a EE e o CO₂Embutido no sistema de estrutura e vedação do padrão construtivo B, conforme os procedimentos realizados com o padrão A. Os demais materiais de revestimento externo não foram considerados. Assume-se, igualmente, que a madeira utilizada neste padrão é proveniente de florestas plantadas com manejo sustentável. Considera-se a vedação das paredes externas com painéis OSB e, com *drywall*, as paredes internas. O quantitativo de materiais para 1m² construído foi adaptado da dissertação de Espíndola (2010) com detalhes retirados do trabalho realizado por Souza (2013), conforme apresentado na Tabela 44.

Tabela 44: Quantitativo de material padrão B

Material	Peso (kg)
Drywall	13,2
OSB	30,5
Madeira estrutural	23,0

5.3. CENÁRIO 1

No cenário 1 utilizam-se os dados obtidos nos Capítulo 4, incluindo as operações florestais. Os quantitativos de EE e CO₂ Embutido não calculados nesta dissertação são obtidos a partir do inventário de energia e carbono de Hammond e Jones (2011), conforme informado na Tabela 45.

Tabela 45: Dados do cenário 1 para o cálculo de EE e CO₂ Embutido nos Padrões A e B

Material	EE (MJ/kg)	CO ₂ Embutido (kgCO ₂ /kg)	Fonte	Limites
Drywall	6,75	0,38	Hammond e Jones (2011)	<i>Cradle-to-gate</i>
Chapa cimentícia	10,40	1,09	Hammond e Jones (2011)	<i>Cradle-to-gate</i>
OSB	243,83	22,85	Autor	<i>Cradle-to-gate</i>
Madeira estrutural	845,60	76,55	Autor	<i>Cradle-to-gate</i>

Na Tabela 46 ilustra-se os cálculos de EE CO₂ Embutido nos padrões A e B.

Tabela 46: EE e CO₂ Embutido nos padrões A e B no cenário 1

Material	Padrão A		Padrão B	
	EE (MJ/m ²)	CO ₂ Embutido (kgCO ₂ /m ²)	EE (MJ/m ²)	CO ₂ Embutido (kgCO ₂ /m ²)
Drywall	175,50	9,88	89,10	5,02
Chapa cimentícia	192,40	20,16	---	---
OSB	7144,21	669,50	7436,81	696,92
Madeira estrutural	19956,16	1806,58	19448,80	1760,65
Total	27468,28	2506,13	26974,71	2462,59

5.4. CENÁRIO 2

No cenário 2 utiliza-se, igualmente, os dados obtidos no Capítulo 4. Entretanto, exclui-se as operações florestais, as quais tiveram peso significativa nos quantitativos de EE e CO₂ Embutido na madeira serrada e na *fiberboard*. Os dados dos demais materiais são retirados do inventário de Hammond e Jones (2011), conforme ilustrado na Tabela 47. Na Tabela 48 ilustram-se os cálculos de EE CO₂ Embutido nos padrões A e B.

Tabela 47: Dados do cenário 2 para o cálculo de EE e CO₂ Embutido nos Padrões A e B

Material	EE (MJ/kg)	CO ₂ Embutido (kgCO ₂ /kg)	Fonte	Limites
Drywall	6,75	0,38	Hammond e Jones (2011)	<i>Cradle-to-gate</i>
Chapa cimentícia	10,40	1,09	Hammond e Jones (2011)	<i>Cradle-to-gate</i>
OSB	27,42	2,23	Autor	<i>Gate-to-gate</i>
Madeira estrutural	6,40	0,538	Autor	<i>Gate-to-gate</i>

Tabela 48: EE e CO₂ Embutido nos padrões A e B no cenário 2

Padrão A			Padrão B	
Material	EE (MJ/m ²)	CO ₂ Embutido (kgCO ₂ /m ²)	EE (MJ/m ²)	CO ₂ Embutido (kgCO ₂ /m ²)
Drywall	175,50	9,88	89,10	5,02
Chapa cimentícia	192,40	20,16	---	---
OSB	803,40	65,34	836,31	68,01
Madeira estrutural	151,04	12,70	147,20	12,37
Total	1322,34	108,08	1072,61	85,40

5.5. CENÁRIO 3

No cenário 3, os dados de EE utilizados no cenário 2 são mantidos, no entanto, substitui-se os quantitativos de CO₂Embutido pelos obtidos no tópico 4.4, os quais incluem o cálculo de estoque de carbono nos produtos de madeira. No balanço de carbono apenas as emissões associadas ao processos industriais são consideradas, descartando as emissões oriundas das operações florestais. Os dados do cenário 3 são apresentados na Tabela 49.

Tabela 49: Dados do cenário 3 para o cálculo de EE e CO₂ Embutido nos Padrões A e B

Material	EE (MJ/kg)	CO ₂ Embutido (kgCO ₂ /kg)	Fonte	Limites
Drywall	6,75	0,38	Hammond e Jones (2011)	<i>Cradle-to-gate</i>
Chapa cimentícia	10,40	1,09	Hammond e Jones (2011)	<i>Cradle-to-gate</i>
OSB	27,42	0,40	Autor	<i>Gate-to-gate</i>
Madeira estrutural	6,40	-1,29	Autor	<i>Gate-to-gate</i>

Na Tabela 50 ilustra-se os cálculos de EE CO₂ Embutido nos padrões A e B.

Tabela 50: EE e CO₂ Embutido nos padrões A e B no cenário 3

Material	Padrão A		Padrão B	
	EE (MJ/m ²)	CO ₂ Embutido (kgCO ₂ /m ²)	EE (MJ/m ²)	CO ₂ Embutido (kgCO ₂ /m ²)
Drywall	175,50	9,88	89,10	5,02
Chapa cimentícia	192,40	20,16	---	---
OSB	803,40	11,72	836,31	12,20
Madeira estrutural	151,04	-30,44	147,20	-29,67
Total	1322,34	11,32	1072,61	-12,45

5.6. CENÁRIO 4

No cenário 4 foram utilizados os dados da pesquisa realizada por Puettmann e Wilson (2005) para a análise dos processos industriais do OSB e da madeira serrada, conforme mostrado na Tabela 51. A abordagem da análise é do tipo *cradle-to-gate*. Para a conversão de unidades, assume-se as mesmas densidades utilizadas pelos autores, 413kg/m³ para a madeira serrada e 651 kg/m³ para o OSB. Os dados de EE e CO₂ Embutido no *drywall* e na chapa cimentícia foram retirados de Hammond e Jones (2011). Através da Tabela 52 são apresentados os resultados de EE e CO₂ Embutido no cenário 4.

Tabela 51: EE e CO₂ Embutido nos materiais por etapa do ciclo de vida

Etapa	EE (MJ /m ²)		CO ₂ Embutido (kgCO ₂ /kg)	
	Madeira serrada	OSB	Madeira serrada	OSB
Colheita	0,34	0,33	0,60	1,03
Manufatura	8,26	16,18		
Transporte	0,35	0,60		
Total	8,95	17,11		

Fonte: Adaptado de Puettmann e Wilson (2005)

Tabela 52: EE e CO₂ Embutido nos padrões A e B no cenário 4

Material	Padrão A		Padrão B	
	EE (MJ/m ²)	CO ₂ Embutido (kgCO ₂ /m ²)	EE (MJ/m ²)	CO ₂ Embutido (kgCO ₂ /m ²)
Drywall *	175,50	9,88	89,10	5,02
Chapa cimentícia *	192,40	20,16	---	---
OSB	501,32	30,17	521,85	31,41
Madeira estrutural	211,22	14,16	205,85	13,80
Total	1080,44	74,38	816,80	50,23

* Fonte: Hammond e Jones (2011)

5.7. CENÁRIO 5

No cenário 5, os resultados de EE na exploração florestal são substituídos pelos dados da pesquisa realizada por May et al. (2012). Os dados incluem as seguintes etapas: plantio, estabelecimento da floresta, gestão, desbaste, derrubada da tora, trituração e transporte. Os requisitos energéticos totais para a realização destas etapas na exploração de 1m³ de madeira é de 173 MJ. Para a conversão de unidades adota-se a mesma densidade do cenário 4, 413kg/m³. Para o cálculo de CO₂ Embutido na madeira serrada e na *fiberboard* estima-se as emissões a partir do método descrito no tópico 4.3. Considera-se as fontes energéticas de origem fóssil, assim como indicado pelos autores. Através da Tabela 53 são apresentados os resultados de EE e CO₂ Embutido no cenário 5.

Tabela 53: EE e CO₂ Embutido nos padrões A e B no cenário 5

Material	Padrão A		Padrão B	
	EE (MJ/m ²)	CO ₂ Embutido (kgCO ₂ /m ²)	EE (MJ/m ²)	CO ₂ Embutido (kgCO ₂ /m ²)
Drywall *	175,50	9,88	89,10	5,02
Chapa cimentícia *	192,40	20,16	---	---
OSB	806,04	67,40	839,05	70,15
Madeira estrutural	158,60	13,40	154,56	13,06
Total	1332,53	110,83	1082,71	88,23

* Fonte: Hammond e Jones (2011)

5.8. ANÁLISE CRÍTICA

Os balanços energéticos mostram claramente a variabilidade de resultados entre os padrões construtivos do sistema *wood frame* e os diferentes cenários (Gráfico 4). Conforme discutido no tópico 4.5., as razões para a discrepância entre os resultados do cenário 1 e os demais cenários são atribuídas aos resultados inesperados dos processos de exploração da madeira. No entanto, quando excluiu-se esta etapa na análise de EE e CO₂Embutido nos materiais, no cenário 2, os números se aproximam dos resultados de trabalhos anteriores e dos demais cenários.

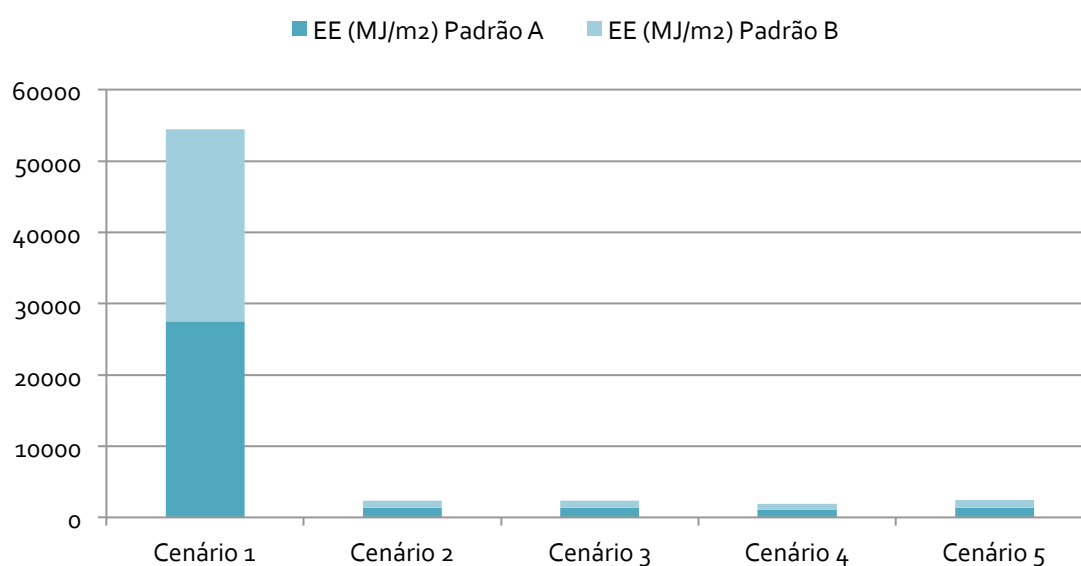


Gráfico 4: Comparativo de EE entre os cenários

Embora o estoque de carbono em produtos de madeira atue em uma esfera teórica para alguns protocolos, os resultados do cenário 3 atestam a representatividade do carbono estocado na madeira para o balanço final de CO₂Embutido nos materiais de construção. Com o balanço de carbono, o CO₂Embutido na madeira serrada diminui 240%, chegando a um resultado negativo. A redução de CO₂Embutido na *fiberboard* foi de 82%.

O padrão construtivo B obteve emissões negativas de gás carbônico, diferentemente do padrão A (Gráfico 5). Percebe-se que o padrão A incorpora grande quantidade de placa cimentícia em sua composição, um material com alta emissão de CO₂ associada aos processos industriais de produção. É possível afirmar que o gás carbônico estocado nos produtos de madeira não foi suficientes para neutralizar as emissões associadas aos demais materiais de construção do padrão construtivo A.

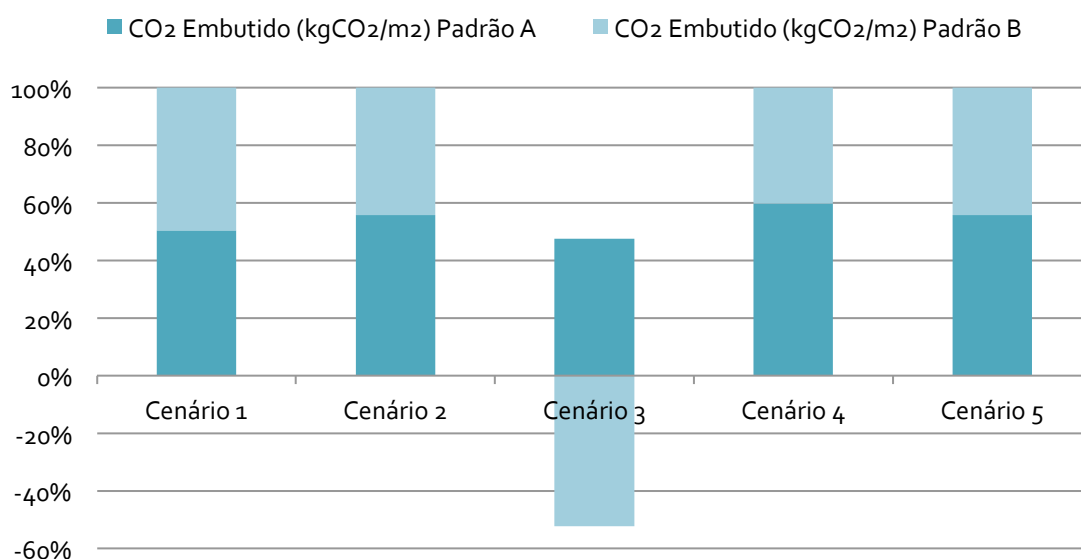


Gráfico 5: Comparativo de CO2Embutido entre os cenários

O estudo de Oliveira et al. (2015) apresenta um quantitativo de EE e CO2Embutido no sistema *wood frame* (padrão A) de 891 MJ/m² e 49 kg/m², respectivamente. Estes valores são, em média, 30 e 50% mais baixos dos que os valores encontrados na análise do cenário 2. No entanto, os dados de EE de dois dos materiais que compõe o sistema foram retirados do mesmo inventário em ambas as pesquisas, realizado por Hammond e Jones (2011). Os métodos de contribuição de gás carbônico também apresentam igualdade metodológica. Dessa forma, percebe-se que a disparidade de resultados é atribuída aos dados de EE e CO2Embutido na madeira serrada e no OSB. Deve-se lembrar que em todos os cenários foram utilizados os dados obtidos através da análise energética da *fiberboard* para o OSB, conforme detalhado no tópico 4.2.

No cenário 4 percebe-se a divergência de resultado gerada a partir da variabilidade de dados. Os quantitativos obtidos a partir das análises energéticas realizadas no capítulo 4 demonstram certa divergência em relação aos dados retirados do inventário de Puettmann e Wilson (2005). Observa-se uma diferença de 28% em relação à EE na madeira serrada, e 37% no OSB. Em termos de CO2Embutido, os quantitativos de Puettmann e Wilson (2005) são 55% mais baixos no OSB e 11% mais altos na madeira serrada. Entre os resultados desta análise e de estudos anteriores (Capítulo 3), a EE na madeira serrada varia entre 1,10 e 21 MJ/kg. Na *fiberboard*, entre 9,14 e 34,64 MJ/kg, e no OSB, não calculado nesta dissertação, entre 9,28 e 36,33 MJ/kg. A variabilidade de dados é discutida no tópico 4.6.

Os resultados do cenário 5 apresentam-se muito próximos aos do cenário 2. O cenário 2 exclui os processos de exploração da madeira, enquanto no cenário 5 adota-se para estas etapas os dados da pesquisa desenvolvida por May et al. (2012). A diferença média de resultados entre os cenários 2 e 5 é de 1% e de 3%, em termos de EE e CO₂Embutido, respectivamente. Estes percentuais convergem com os resultados obtidos por Murphy et al. (2015), os quais demonstram que as etapas de exploração florestal representam de 3 à 4% dos requisitos energéticos totais atribuídos à fabricação da *fiberboard*. No OSB, as mesmas etapas representam de 4 à 5% do total de CO₂Embutido.

A diferença de resultados entre os padrões construtivos A e B é atribuída à composição dos sistemas. Os quantitativos de materiais demonstram que ambos os padrões incorporam quantidades equivalentes de madeira serrada. Observa-se que no padrão B dispensa-se o uso da placa cimentícia e do painel OSB no lado interno. Por outro lado, a quantidade de OSB é equivalente nos dois padrões. O *drywall* é empregado nas mesmas proporções em ambos os padrões, no entanto o quantitativo do padrão A equivale ao dobro do padrão B. Os materiais estão quantificados em kg e, por este motivo, a discordância pode ser explicada pela densidade dos painéis OSB e espessura do *drywall*.

Verifica-se que para uma mesma técnica construtiva é possível identificar composições variadas de materiais, desta forma não se pode generalizar os resultados obtidos nesta análise para o sistema construtivo *wood frame*, e sim para dois sistemas construtivos de madeira distintos. Acredita-se que a rotulação do *wood frame* como um sistema construtivo com menores impactos ambientais associados é excessivamente frágil, uma vez que a avaliação dos impactos ambientais deste sistema incorporam muitas variáveis. Uma das variáveis não exploradas por esta pesquisa e, que poderiam gerar alterações nos resultados das análises, são as características anatômicas das espécies florestais e as propriedades físicas da madeira.

Os resultados das análises indicam que a variabilidade de dados é a causa central das divergências nas avaliações de impactos ambientais do sistema construtivo, demonstrando certa fragilidade nos resultados finais. Entretanto, pode-se considerar esta análise com uma avaliação preliminar dos impactos ambientais associados ao sistema *wood frame*. Estima-se que os dados obtidos através das análises energéticas e a determinação das emissões de CO₂ associadas aos materiais de construção auxiliem na condução de futuras ACVs no ambiente construído.

6. CONCLUSÕES

Além dos resultados discutidos na Análise Crítica (Tópico 5.8), três outras conclusões merecem destaque como contribuição geral à exploração dos requisitos energético e às emissões de gás carbônico ligadas aos processos industriais dos materiais de construção. E também aos impactos ambientais associados ao sistema construtivo *wood frame*.

A primeira delas é que embora as análises energéticas confirmem o pressuposto de que os processos de exploração da madeira influenciam significativamente nos quantitativos de EE e CO₂Embutido nos produtos de madeira, a bibliografia demonstra que a porcentagem de EE atribuída a estes processos representam apenas uma pequena fração do total dos requisitos energéticos. Os processo envolvidos na exploração florestal incluem o uso de equipamentos para corte, veículos para o transporte das toras e secadores de madeira. O dimensionamento deste equipamentos e o consumo energético variam conforme a espécie florestal, o diâmetro das toras e a eficiência da operação. Acredita-se que a determinação dos requisitos energéticos e das emissões de CO₂ envolvem muitas variáveis e que não pode-se obter uma conclusão sobre estas etapas sem antes investigar profundamente os processos de exploração da madeira.

A segunda conclusão é que os resultados determinam o desempenho ambiental do sistema *wood frame* sob o aspecto de uma dos parâmetros de sustentabilidade. Existem outras categorias de impacto igualmente relevantes que podem contribuir para a avaliação ambiental do sistema. Com base nos resultados da análise *cradle-to-gate* determina-se a EE inicial no sistema *wood frame*, quando aplicado à uma edificação corresponde a primeira etapa do ciclo de vida. Ainda deve-se considerar o desempenho energético operacional de uma edificação em *wood frame*, a energia requisitada para manutenção do sistema e a desconstrução e disposição final dos resíduos no final do ciclo de vida.

A terceira conclusão é que por meio da escolha de materiais que associam menos EE e CO₂Embutido pode-se reduzir os impactos ambientais iniciais da edificação. Outra variável que determina o desempenho ambiental de um edifício é a forma na qual os materiais de construção serão incorporados ao projeto. As análises energéticas preliminares, realizadas nas etapas iniciais de desenvolvimento de projeto, são capazes de avaliar certos parâmetros de sustentabilidade de padrões construtivos. Por tanto, conclui-se que a produção de dados EE e CO₂Embutido em materiais de construção e em sistemas construtivos contribui de

forma positiva para a avaliação dos impactos ambientais de futuras intervenções no ambiente construído.

Apesar de explorar abordagens distintas dos requisitos energéticos e das emissões de CO₂ associadas ao processo industrial dos materiais de construção e ao sistema construtivo *wood frame*, admite-se como limitação dessa dissertação as seguintes questões: explora-se apenas um parâmetro de sustentabilidade; a análise limita-se à extração da madeira e a manufatura dos materiais de construção; gases poluentes oriundos dos processos industriais dos materiais de construção não são estimados; o transporte das toras até a fábrica e dentro desta é desconsiderado; a avaliação do sistema *wood frame* limita-se a etapa pré-operacional. Considera-se uma limitação importante a indisponibilidade de dados energéticos nos processos industriais do OSB.

Dessa forma, para trabalhos futuros, sugere-se o aprofundamento específico de cada uma das áreas exploradas na pesquisa. Ou seja, abranger os seguintes tópicos:

- o consumo energético nos processos de plantio e manejo;
- o consumo energético dos equipamentos utilizados na exploração da madeira;
- o transporte da madeira até a fábrica;
- a geração de energia a partir de resíduos da madeira;
- os processos locais de manufatura de materiais de construção de madeira;
- os demais impactos ambientais associados ao ciclo de vida dos produtos de madeira;
- o consumo energético operacional de uma edificação em *wood frame*;
- o consumo energético de desconstrução do *wood frame*;
- a avaliação de outros parâmetros de sustentabilidade;
- estudos correlatos para comparar resultados e métodos

Conclui-se que este trabalho não encerra as discussões sobre os requisitos energéticos e as emissões de CO₂ associadas aos processos industriais da madeira serrada e da *fiberboard*, tampouco sobre o desempenho ambiental do sistema construtivo *wood frame*, mas contribui para a condução de futuras ACV no ambiente construído.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADALBERTH, K. Energy use during the life cycle of buildings: a method. **Building and Environment**, v. 32, p. 317-320. Elsevier Science Ltd. 1997.

ALCORN, J. **Global Sustainability and the New Zealand house**. A thesis submitted to the Victoria University of Wellington – Centre for Building Research. New Zealand, 2010.

AMERICAN FOREST & PAPER ASSOCIATION. **Details for Conventional Wood Frame Construction**. United States, 2001.

AMERICAN WOOD COUNCIL. **Wood Frame Construction Manual**. United States, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE (ABIMCI). **Estudo setorial. 2009**. Curitiba: ABIMCI, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575-1: Edificações Habitacionais - Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro: ABR, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS (ABRAF). **Anuário estatístico da ABRAF**. 2010. Brasília, ABRAF, 2009.

AYRES, C. F. **Acesso ao modelo integrado do edifício. Dissertação** (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Setor de Exatas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

BASBAGILL, J.; FLAGER, F.; FISCHER, M. Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts. **Building and Environment**, v. 60, p. 81-92. Elsevier Science Ltd. 2013.

BOYD, C. W.; KOCH, P.; MCKEAN, H. B.; MORSCHAUER, C. R.; PRESTON, S. B.; WANGAARD, F. F. Wood for structural and architectural purposes. **Forest Products Journal**, v. 27, p. 10-20. 1977.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional**. 2015. Brasília, 2015.

_____. Ministério do Meio Ambiente, Serviço Florestal Brasileiro. **Florestas do Brasil**. 2010. Brasília, 2010.

_____. Ministério do Meio Ambiente, Serviço Florestal Brasileiro. **Florestas do Brasil**. 2010. Brasília, 2014.

BRAND, M. A. **Rendimento do processo produtivo e energético da matéria-prima de uma indústria de base florestal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

BRIBIÁN, I. Z.; CAPILLA, A. V.; USÓN A. A Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. **Building and Environment**, 46, p. 1133-1140. Elsevier Science Ltd. 2011.

BROWN, H. L.; HAMEL, B. B.; HEDMAN, B. A. **Energy analysis of 108 industrial processes**. Fairmont Press, 1996.

CANADA MORTGAGE AND HOUSING CORPORATION. **Canadian wood-frame house construction**. Canada, 2013.

CASTRO, S.C.L.. **O uso da madeira em construções habitacionais: a experiência do passado e a perspectiva de sustentabilidade no exemplo da arquitetura chilena**. Dissertação (Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

CHEHEBE, J. R. B. **Análise de ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO14000**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1998.

DATec nº 020. DATec nº 020 - **Sistema Construtivo TECVERDE**: "Sistema leve em madeira", 2013.

DRUSZCZ, M. T. **Avaliação dos aspectos ambientais dos materiais de construção civil – uma revisão bibliográfica com estudo de caso do bloco cerâmico**. (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

ESPÍNDOLA, L.R. **Habitação de interesse social em madeira conforme os princípios de coordenação modular e conectividade**. (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

FAY, R.; TRELOAR, G.; IYER-RANIGA, U. Life-cycle energy analysis of buildings: a case study. **Building Research and Information**, v.28, n.1, p.31-41, Jan./Feb. 2000.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas S.A., 2010.

GRAF, H. F.; TAVARES, S. F. **Energia Incorporada dos Materiais de uma Edificação Padrão Brasileira Residencial**. Curitiba: Universidade Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2010.

GUIA DA CONSTRUÇÃO. 2013. **MCMV de madeira**. Guia da Construção, 146: 16 – 21.

GUSTAVSSON, L.; SATHRE, R. Variability in energy and carbon balances of wood and concrete building materials. **Building and Environment**, v. 41, p. 940-951. Elsevier Science Ltd. 2006.

HAMMOND, G.P.; JONES, C.I. **Inventory of Carbon and Energy (ICE)**. University of Bath, 2008. Disponível em: < <http://opus.bath.ac.uk/12382/>> Acesso em: 25.02.2016.

HEINONEN, J.; SAYNAJOKI, A.; JUNNONEN, J. M.; POYRY, A.; JUNNILA, S. Pre-use phase LCA of a multi-story residential building: can greenhouse gas emissions be used as more general environmental performance indicator? **Building and Environment**, v. 95, p. 116-125. Elsevier Science Ltd. 2016.

HILGENBERG NETO, M. F. **Estudo de viabilidade técnico/econômica da casa de madeira popular no Estado do Paraná**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

IPCC, **Intergovernmental Panel on Climate Change**. IPCC - Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Geneva, Switzerland.2006.

ISO, International Organization for Standardization. **ISO 14040**: Environmental management — life cycle assessment — principles and framework. Geneva, Switzerland, 1997.

JUNIOR, E. D. O.; SEIXAS, F. **Energy analysis of two eucalyptus harvesting systems in Brazil**. In: Council on Forest Engineering Annual Meeting, nº35, 2012, North Carolina.

JOHN DEERE. **Forestry Products**. Disponível em <https://www.deere.com/en_US/products/equipment/> Acesso em 10 fev. 2016.

KUA, H. W.; KAMATH, S. An attribution and consequential life cycle assessment of substituting concrete with bricks. **Journal of Cleaner Production**, v. 81, p.190-200. Elsevier Science Ltd. 2014.

KOCK, P.; COUGHRAN, S. J. Development of a puller-buncher for harvesting southern pines with taproot attached. **Forest Products Journal**, v.24, p. 25 - 30. 1976.

KAESTNER, D. Life Cycle Assessment of the Oriented Strand Board and Plywood Industries in the United States of America. Master Thesis – University of Tennessee, Knoxville, 2015.

LP BUILDING PRODUCTS. **Produtos**. Disponível em < www.lpbrasil.com.br/osb > Acesso em 10 fev. 2016.

LIPPKE, B.; WILSON, J.; PEREZ-GARCIA, J.; BOWYER, J.; MEIL, J. Life-cycle environmental building materials. **Forest Production**, v. 54, p. 8-19. 2004.

LOBO, F. H. R. **Metodologia de inventário de emissão equivalente de dióxido de carbono por meio de análise energética de composição de serviço de obras pelo ciclo de vida de edificações**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

MARQUES, L. E. M. M. **O papel da madeira na sustentabilidade da construção**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto, 2008.

MARCHESINI, I. **Análise da influência do mobiliário em MDF no ciclo de vida energético da edificação: Um estudo sobre a energia embutida no mobiliário de escritórios comerciais.** Dissertação (Mestrado no Programa de Pós- Graduação em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

MAY, B.; ENGLAND, J. R.; RAISON, R. J.; PAUL, K. I. Cradle-to-gate inventory of wood production from Australian softwoods plantation and native hardwood forest: embodied energy, water use and other inputs. **Forest Ecology and Management**, v. 264, p. 37-50. Elsevier Science Ltd. 2012.

MITHRARATNE, N.; VALE, B. Life cycle analysis model for New Zealand houses. **Building and Environment**, 39, 483-492, 2004.

MONCASTER, A. M., SYMONS, K. E. A method and tool for “cradle to grave” embodied carbon energy impacts of UK buildings in compliance with the new TC350. **Energy and Building**, v. 66, p. 514-523. Elsevier Science Ltd. 2013.

MONICH, C. R. **Avaliação ambiental de uma habitação de interesse social pré-fabricada em madeira no sistema wood frame no estado do Paraná.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

MURPHY, F.; DEVLIN, G.; MCDONNELL. Greenhouse gas and energy based life cycle analysis of products from the Irish wood processing industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 92, p. 134-141. Elsevier Science Ltd. 2015.

NASSÉN, J.; HEDENUS, F.; KARLSSON, S.; HOLMBERG, J. Concrete vs. Wood in buildings – An energy system approach. **Building and Environment**, v. 51, p. 361-369. Elsevier Science Ltd. 2012.

OBA, M. M. **O projeto de readequação visando a construção mais sustentável no edifício moderno: estudo de caso sobre o centro politécnico da UFPR.** (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

OLIVER, C. D.; NASSAR, N. T.; LIPPKE, B. R.; MCCARTER, J. B. 2014. Carbon, fossil fuel and biodiversity mitigation with wood and forests. **Journal of Sustainable Forestry**, 33: 248-275.

OLIVEIRA, E.; MONICH, C.; TAVARES, S. F. Wood frame, energia embutida e emissão de CO_2 : uma análise comparativa ao sistema construtivo convencional. In: Encontro Nacional e Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído, 13., 9., 2015, Campinas. **Anais...**Porto Alegre: ANTAC, 2015.

UNITED NATIONS. **Conference of the Parties Twenty-first session**. 2015. Paris, 2015.

UNITED STATES CENSUS BUREAU. **Guide to Data Sources for Manufacturing of United States** Disponível em < <http://www.census.gov/econ/manufacturing.html> > Acesso em 10 fev. 2016.

PAULSEN, J. S.; SPOSTO, R.M. A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: Case study for the program "MY HOUSE MY LIFE". **Energy and Buildings**, v. 57, p.95-102. Elsevier Science Ltd. 2013.

PUETTMANN, M. E.; WILSON, J. B. Life Cycle analysis of wood products: cradle-to-gate LCI of residential wood building materials. **Wood and Fiber Science**, v. 37, p. 18-29. Society of Wood Science and Technology. 2005.

PUETTMANN, M. E.; ONEIL, E.; KLINE, E.; JOHNSON, L. **Cradle to gate life cycle assessment of oriented strand board production from the southeast**. Wood Life Environmental Consultants, 2013.

ROAF, S. **Ecohouse** – A casa ambientalmente sustentável. Porto Alegre: Bookman, 2014.

SALAZAR, J.; MEIL, J. Prospects for carbon-neutral housing: the influence of greater wood use on the carbon footprint of a single-family residence. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, p. 1563-1571. Elsevier Science Ltd. 2009.

SEDJO, R. A. **Wood materials used as a means to reduce greenhouse gases and extermination of wooden utility poles**. North American Wood Pole Coalition. 2001.

SETAC. **A technical framework for Life Cycle Assessment**. Society of Environmental Toxicology and Chemistry Workshop report. Smugglers Notch, Vermont, 1991.

SiNAT 005. Diretriz SiNAT nº 005 - **Diretriz para Avaliação Técnica de sistemas construtivos estruturados em peças de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas delgadas** - Sistemas leves tipo "Light Wood Framing", 2011.

SOUZA, R. V. **Aspectos ambientais e de custo de produção do sistema plataforma em madeira para habitação de interesse social: estudo de caso em Florianópolis**. (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

TAKANO, A.; WINTER, S.; HUGHES, M.; LINKOSALMI, L. Comparison of life cycle assessment database: a case study on building assessment. **Building and Environment**, 79, p. 20-30. Elsevier Science Ltd. 2014.

TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TAVARES, S. F.; LOPES, T. V.; SAVI, A.; OLIVEIRA, E. Telhado verde, energia embutida e emissão de CO₂: análise comparativa a coberturas convencionais. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 16., 2014, Maceió. **Anais...**Porto Alegre: ANTAC, 2014.

WANG, L.; TOPPINEN, A.; JUSLIN, H. Use of wood in green building: a study of expert perspectives. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 350-361. Elsevier Science Ltd. 2014.

WOOD UNIVERSITY. **Glossary**. Disponível em < www.wooduniversity.org/glossary > Acesso em 10 jul. 2015.

YIN, R. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. Porto Alegre: Bookman, 2001.

APÊNDICE

APÊNDICE A - Cálculo de Energia Embutida e CO₂ Embutido nos materiais de construção

Aço

Total EElétrica (MJ/kg)	Total ETérmica (MJ/kg)	EE Total (MJ/kg)	
0,132	26,8	27,0	
Fonte	Geração de CO ₂ por fonte energética (kgCO ₂ /MJ)	EElétrica (MJ/kg)	CO ₂ Embutido (kgCO ₂ /kg)
Eletricidade	0,0423	0,132	0,005
Fonte	Geração de CO ₂ por fonte energética (kgCO ₂ /MJ)	ETérmica (MJ/kg)	CO ₂ Embutido (kgCO ₂ /kg)
Carvão mineral	0,0915	26,8	2,45
CO ₂ Embutido EElétrica (kg CO ₂ /kg)	CO ₂ Embutido ETérmica (kg CO ₂ /kg)	CO ₂ Embutido Total (kgCO ₂ /kg)	
0,005	2,45	2,45	

Alumínio

Total EElétrica (MJ/kg)	Total ETérmica (MJ/kg)	EE Total (MJ/kg)	
4,62	10,36	14,98	
Fonte	Geração de CO ₂ por fonte energética (kgCO ₂ /MJ)	EElétrica (MJ/kg)	CO ₂ Embutido (kg CO ₂ /kg)
Eletricidade	0,0423	4,62	0,195
Fonte	Geração de CO ₂ por fonte energética (kgCO ₂ /MJ)	ETérmica (MJ/kg)	CO ₂ Embutido (kg CO ₂ /kg)
Carvão mineral	0,0915	10,36	0,947

CO ₂ Embutido EElétrica (kgCO ₂ /kg)	CO ₂ Embutido ETérmica (kgCO ₂ /kg)	CO ₂ Embutido Total (kgCO ₂ /kg)
0,195	0,947	1,14

Cal hidratada

Total EElétrica (MJ/kg)	Total ETérmica (MJ/kg)	EE Total (MJ/kg)
0,186	5,90	6,08

Fonte	Geração de CO ₂ por fonte energética (kgCO ₂ /MJ)	EElétrica (MJ/kg)	CO ₂ Embutido (kg CO ₂ /kg)
Eletricidade	0,0423	0,186	0,007

Fonte	Geração de CO ₂ por fonte energética (kgCO ₂ /MJ)	ETérmica (MJ/kg)	CO ₂ Embutido (kg CO ₂ /kg)
Carvão mineral	0,0915	5,90	0,540

CO ₂ Embutido EElétrica (kgCO ₂ /kg)	CO ₂ Embutido ETérmica (kgCO ₂ /kg)	CO ₂ Embutido Total (kgCO ₂ /kg)
0,007	0,54	0,547

Concreto

Total EElétrica (MJ/kg)	Total ETérmica (MJ/kg)	EE Total (MJ/kg)
0,056	0,760	0,816

Fonte	Geração de CO ₂ por fonte energética (kgCO ₂ /MJ)	EElétrica (MJ/kg)	CO ₂ Embutido (kg CO ₂ /kg)
Eletricidade	0,0423	0,056	0,002

Fonte	Geração de CO ₂ por fonte energética (kgCO ₂ /MJ)	ETérmica (MJ/kg)	CO ₂ Embutido (kg CO ₂ /kg)
Carvão mineral	0,0915	0,760	0,070
CO ₂ Embutido EElétrica (kgCO ₂ /kg)	CO ₂ Embutido ETérmica (kgCO ₂ /kg)	CO ₂ Embutido Total (kgCO ₂ /kg)	
0,002	0,070	0,072	

Gesso

Total EElétrica (MJ/kg)	Total ETérmica (MJ/kg)	EE (MJ/kg)
0,154	2,60	2,754

Fonte	Geração de CO ₂ por fonte energética (kgCO ₂ /MJ)	EElétrica (MJ/kg)	CO ₂ Embutido (kg CO ₂ /kg)
Eletricidade	0,0423	0,154	0,006

Fonte	Geração de CO ₂ por fonte energética (kgCO ₂ /MJ)	ETérmica (MJ/kg)	CO ₂ Embutido (kg CO ₂ /kg)
Carvão mineral	0,0915	2,60	0,238
CO ₂ Embutido EElétrica kgCO ₂ /kg)	CO ₂ Embutido ETérmica (kgCO ₂ /kg)	CO ₂ Embutido Total (kgCO ₂ /kg)	
0,006	0,238	0,244	

Lã mineral

Total EElétrica (MJ/kg)	Total ETérmica (MJ/kg)	EE Total (MJ/kg)
2,18	18,96	21,14

Fonte	Geração de CO ₂ por fonte energética (kgCO ₂ /MJ)	EElétrica (MJ/kg)	CO ₂ Embutido (kg CO ₂ /kg)
Eletricidade	0,0423	2,18	0,092

Fonte	Geração de CO ₂ por fonte energética (kgCO ₂ /MJ)	ETérmica (MJ/kg)	CO ₂ Embutido (kg CO ₂ /kg)
Carvão mineral	0,0915	18,96	1,73

CO ₂ Embutido EElétrica (kgCO ₂ /kg)	CO ₂ Embutido ETérmica (kgCO ₂ /kg)	CO ₂ Embutido Total (kgCO ₂ /kg)
0,092	1,73	1,822

Tijolo

Total EElétrica (MJ/kg)	Total ETérmica (MJ/kg)	EE (MJ/kg)
0,356	4,944	5,3

Fonte	Geração de CO ₂ por fonte energética (kgCO ₂ /MJ)	EElétrica (MJ/kg)	CO ₂ Embutido (kg CO ₂ /kg)
Eletricidade	0,0423	0,356	0,0150

Fonte	Geração de CO ₂ por fonte energética (kgCO ₂ /MJ)	ETérmica (MJ/kg)	CO ₂ Embutido (kg CO ₂ /kg)
Carvão mineral	0,0915	4,944	0,452

CO ₂ Embutido EElétrica (MJ/kg)	CO ₂ Embutido ETérmica (MJ/kg)	CO ₂ Embutido Total (kgCO ₂ /kg)
0,0150	0,452	0,467

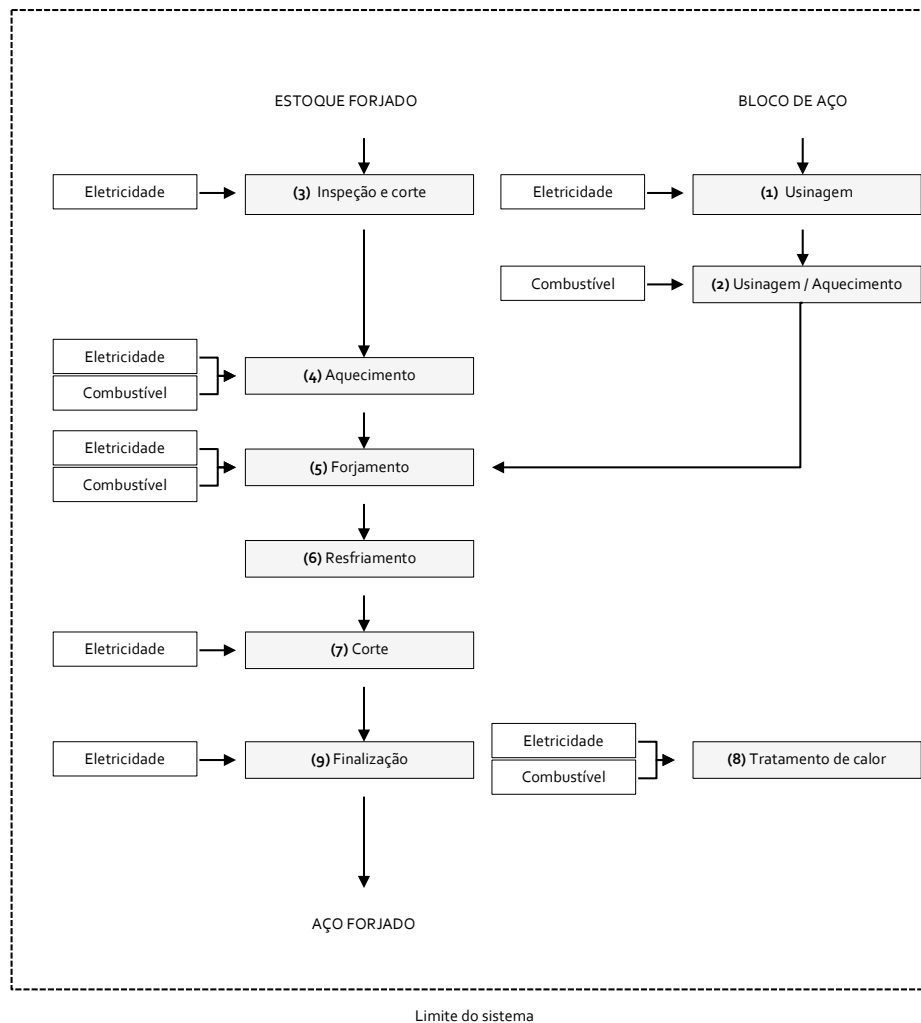
Vidro

Total EElétrica (MJ/kg)	Total ETérmica (MJ/kg)	EE Total (MJ/kg)	
0,771	11,80	12,57	
Fonte	Geração de CO ₂ por fonte energética (kgCO ₂ /MJ)	EElétrica (MJ/kg)	CO ₂ Embutido (kg CO ₂ /kg)
Eletricidade	0,0423	0,771	0,032
Fonte	Geração de CO ₂ por fonte energética (kgCO ₂ /MJ)	ETérmica (MJ/kg)	CO ₂ Embutido (kg CO ₂ /kg)
Carvão mineral	0,0915	11,80	1,08
CO ₂ Embutido EElétrica (kgCO ₂ /kg)	CO ₂ Embutido ETérmica (kgCO ₂ /kg)	CO ₂ Embutido Total (kgCO ₂ /kg)	
0,032	1,08	1,11	

ANEXO

ANEXO A – Fluxo de energia nos processos industriais dos materiais de construção

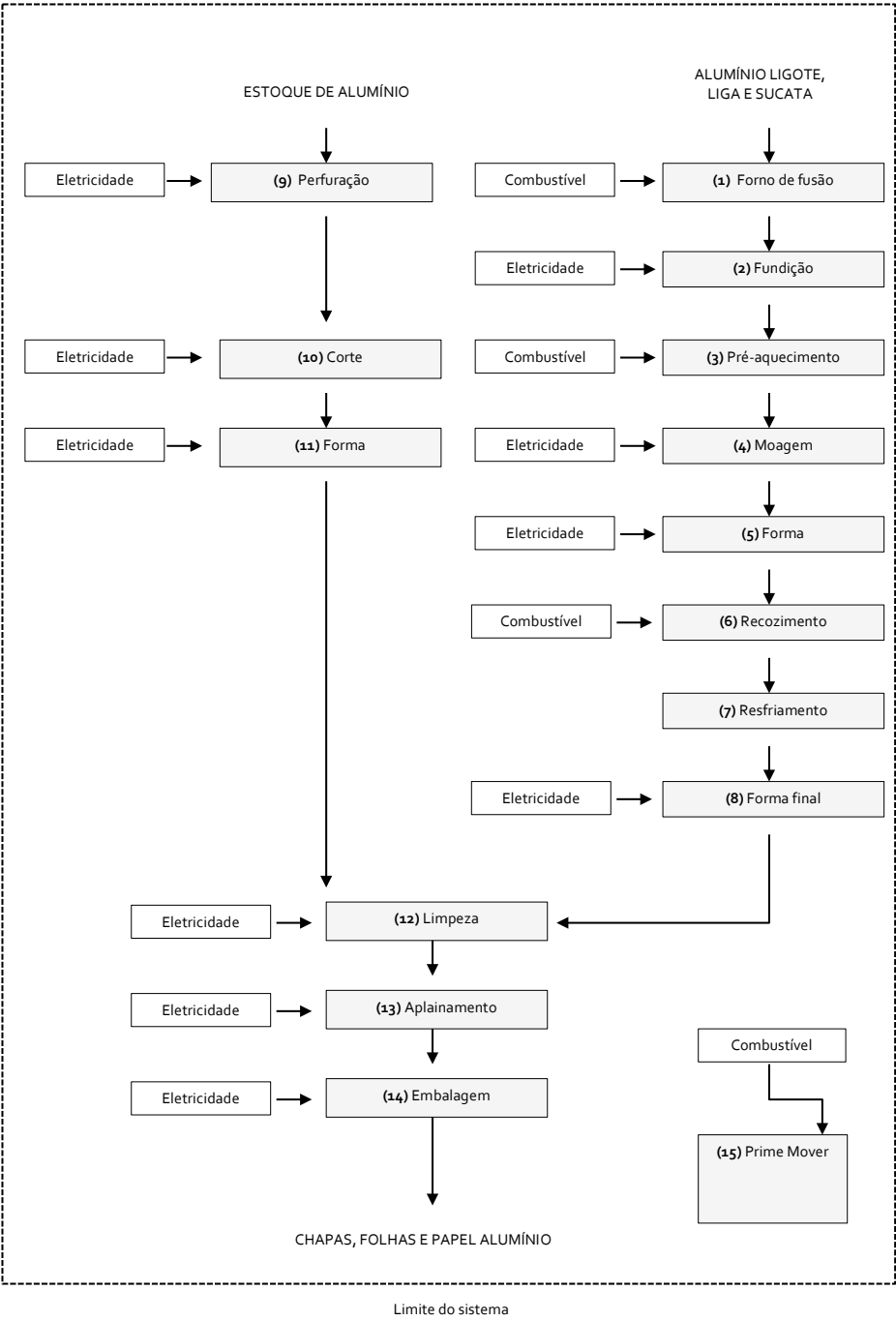
Aço



Etapa	Entrada EElétrica (MJ/kg)	Saída EElétrica (MJ/kg)	Entrada ETérmica (MJ/kg)
(1) Usinagem	0,052	---	---
(2) Usinagem / Aquecimento	---	---	8,44
(3) Inspeção e corte	0,031	---	---
(4) Aquecimento	1,055	---	9,50
(5) Forjamento	0,062	---	1,48
(6) Resfriamento	---	---	---
(7) Corte	0,004	---	---
(8) Tratamento de calor	0,004	---	16,88
(9) Finalização	0,010	---	---

Fonte: Adaptado de *Brown, Hamel e Hedman* (1996)

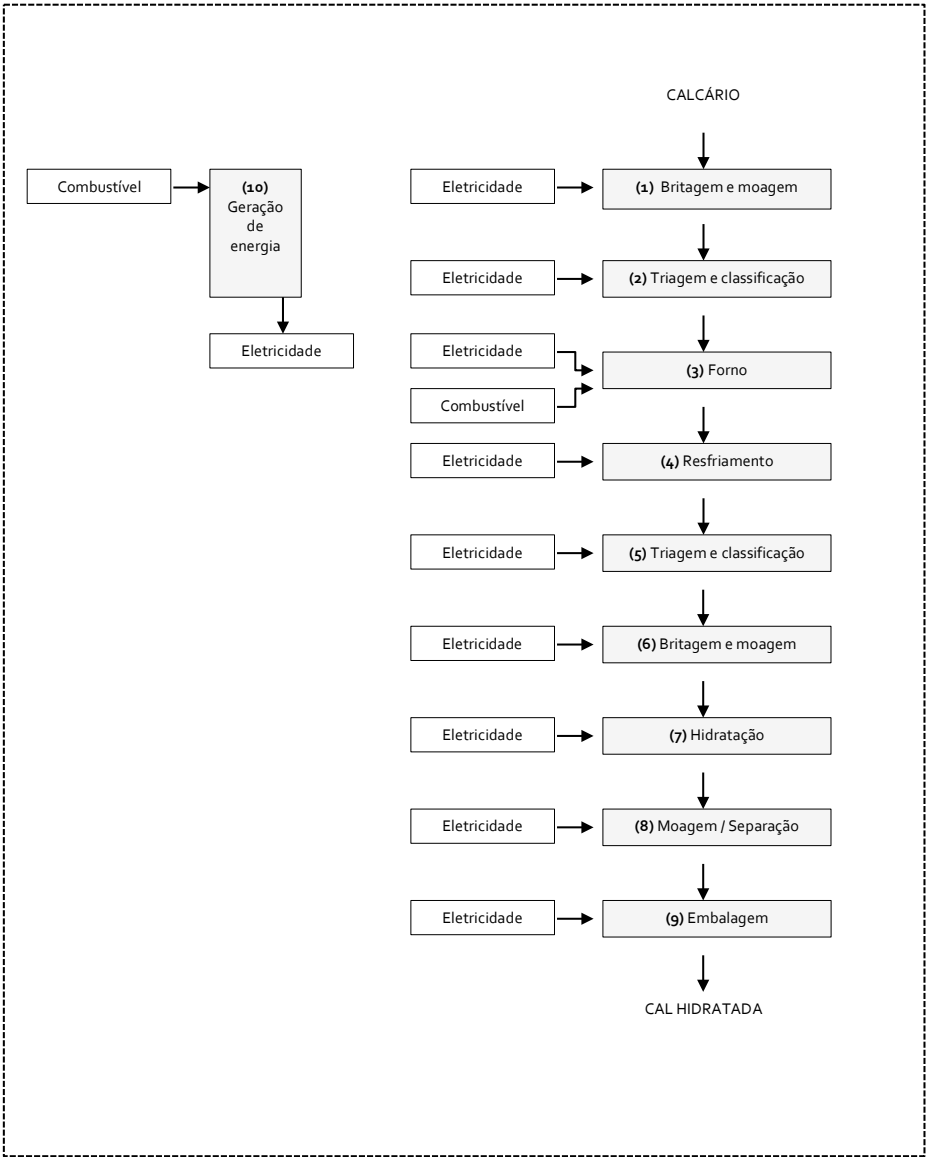
Alumínio



Etapa	Entrada EElétrica (MJ/kg)	Saída EElétrica (MJ/kg)	Entrada ETérmica (MJ/kg)
(1) Forno de fusão	---	---	5,09
(2) Fundição	0,295	---	
(3) Pré-aquecimento	---	---	2,745
(4) Moagem	0,601	---	---
(5) Forma	1,626	---	---
(6) Recozimento	---	---	2,153
(7) Resfriamento	---	---	---
(8) Forma final	0,601	---	---
(9) Perfuração	0,295	---	---
(10) Corte	0,295	---	---
(11) Forma	0,802	---	---
(12) Limpeza	0,601	---	---
(13) Aplainamento	0,601	---	---
(14) Embalagem	0,295	---	---
(15) Prime Mover	---	---	0,380

Fonte: Adaptado de *Brown, Hamel e Hedman* (1996)

Cal hidratada

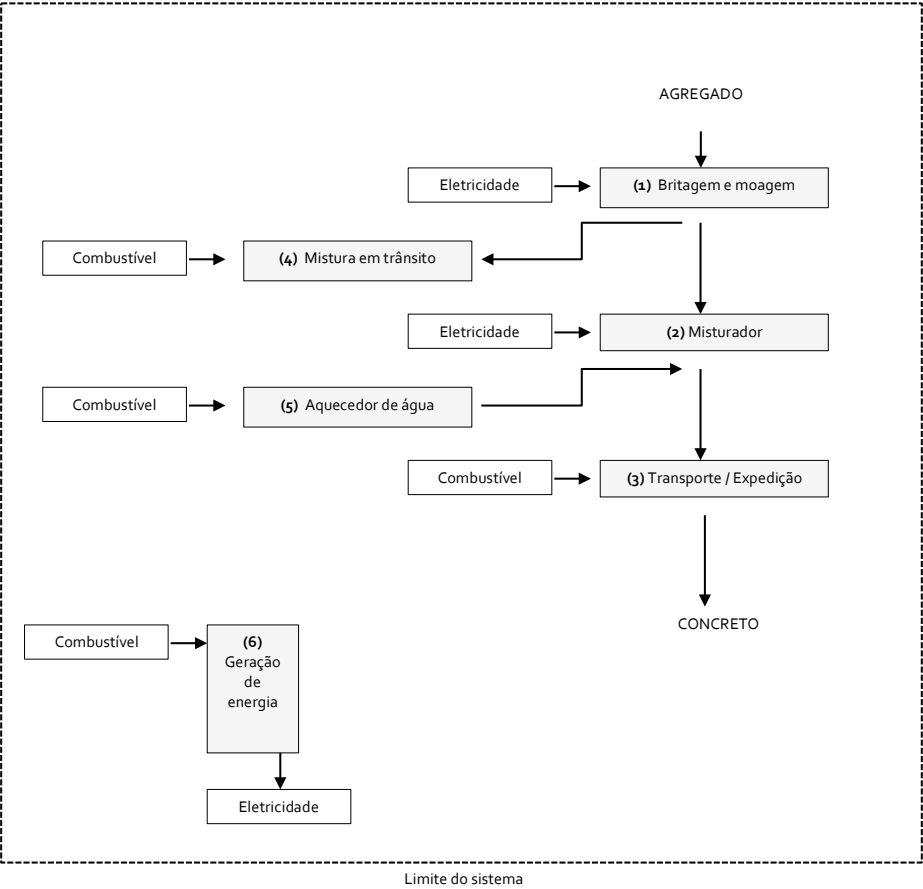


Limite do sistema

Etapa	Entrada EElétrica (MJ/kg)	Saída EElétrica (MJ/kg)	Entrada ETérmica (MJ/kg)
(1) Britagem e moagem	0,030	---	---
(2) Triagem e classificação	0,016	---	---
(3) Forno	0,022	---	5,90
(4) Resfriamento	0,034	---	---
(5) Triagem e classificação	0,016	---	---
(6) Britagem e moagem	0,034	---	---
(7) Hidratação	0,030	---	---
(8) Moagem / Separação	0,002	---	---
(9) Embalagem	0,002	---	---
(10) Geração de energia	---	0,0002	0.0006

Fonte: Adaptado de *Brown, Hamel e Hedman* (1996)

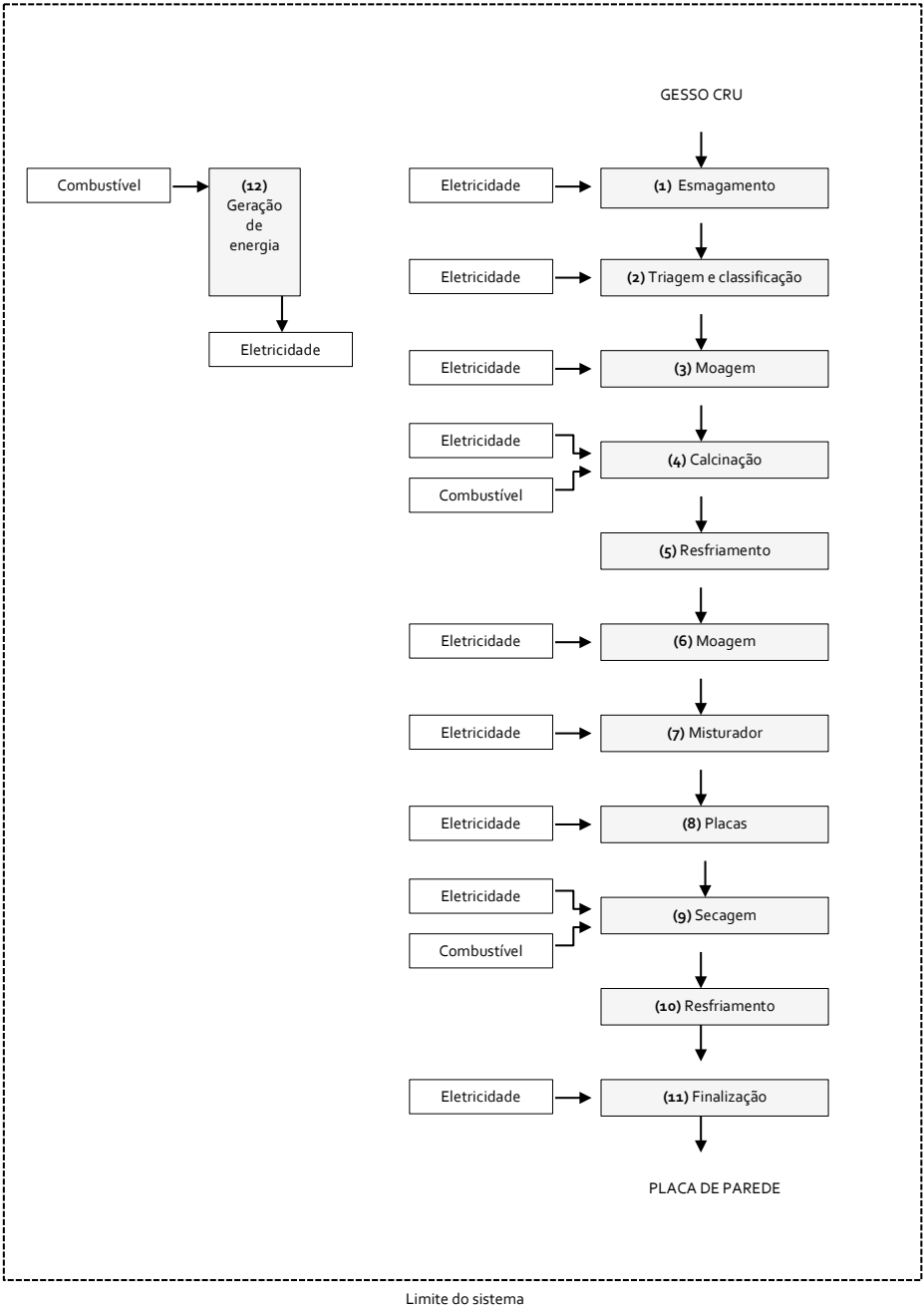
Concreto



Etapa	Entrada	Saída	Entrada
	EElétrica	EElétrica	ETérmica
	(MJ/kg)	(MJ/kg)	(MJ/kg)
(1) Britagem e moagem	0,036	---	---
(2) Misturador	0,022	---	---
(3) Transporte / Expedição	---	---	0,064
(4) Mistura em trânsito	---	---	0,680
(5) Aquecedor de água	----	---	0,012
(6) Geração de energia	---	0,0014	0,004

Fonte: Adaptado de *Brown, Hamel e Hedman* (1996)

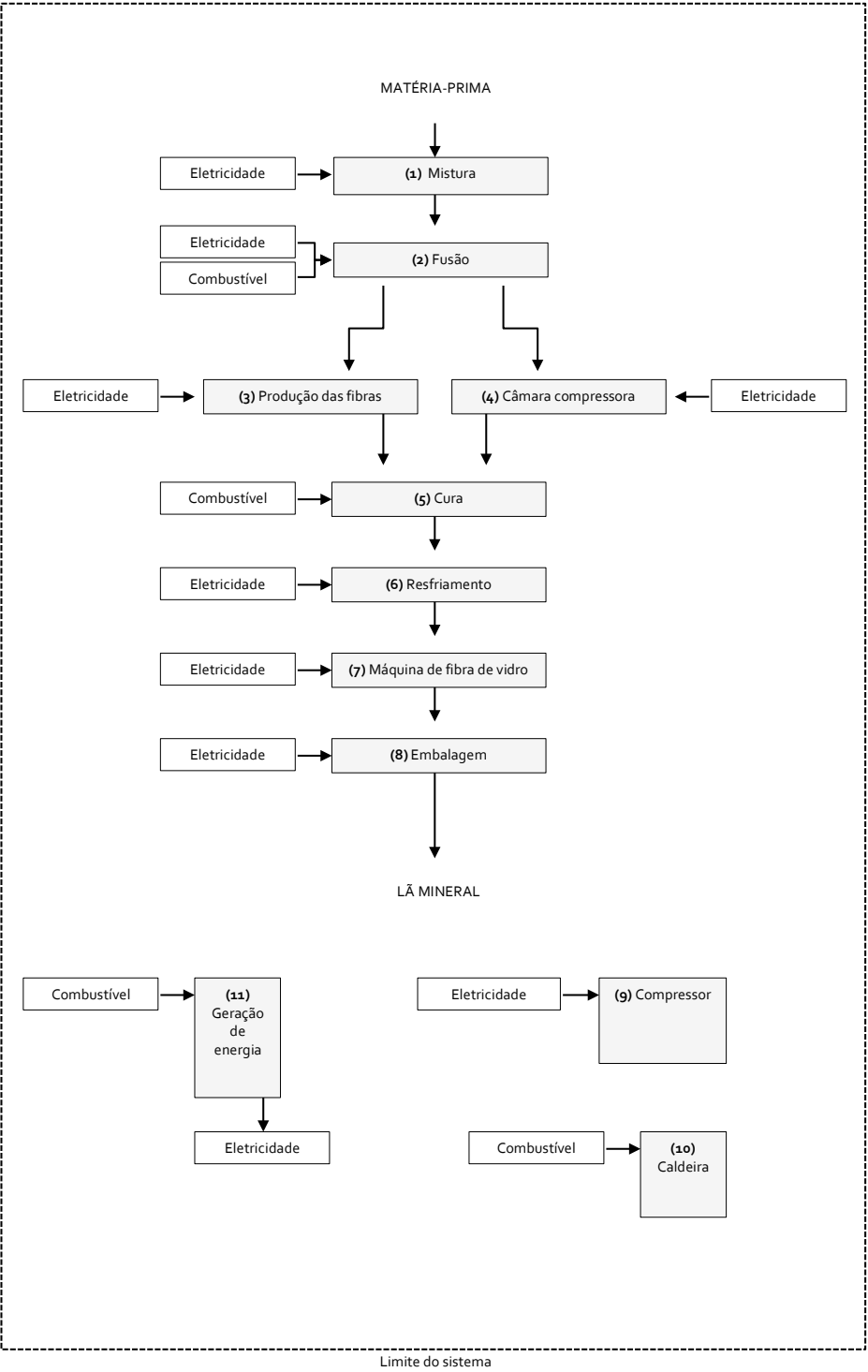
Gesso



Etapa	Entrada EElétrica (MJ/kg)	Saída EElétrica (MJ/kg)	Entrada ETérmica (MJ/kg)
(1) Esmagamento	0,006	---	---
(2) Triagem e classificação	0,002	---	---
(3) Moagem	0,038	---	---
(4) Calcinação	0,034	---	1,002
(5) Resfriamento	---	---	---
(6) Esmagamento	0,024	---	---
(7) Misturador	0,012	---	---
(8) Placas	0,028	---	---
(9) Secagem	0,006	---	1,582
(10) Resfriamento	---	---	---
(11) Finalização	0,006	---	---
(12) Geração de energia	---	0,0017	0,010

Fonte: Adaptado de *Brown, Hamel e Hedman* (1996)

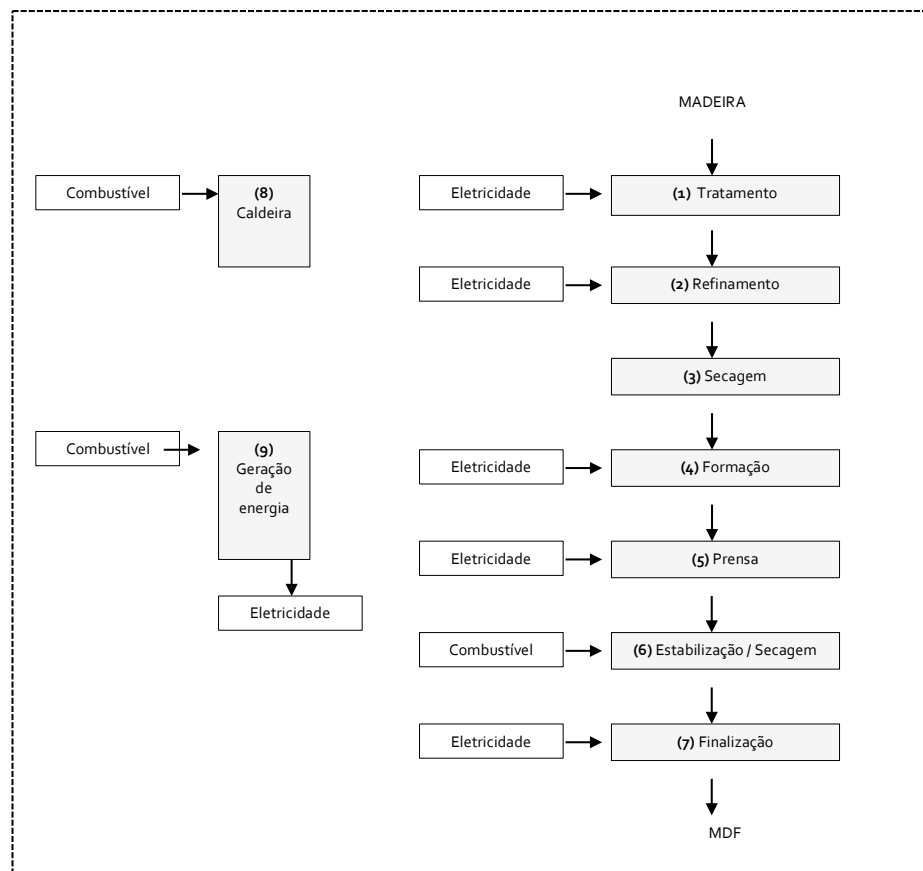
Lã mineral



Etapa	Entrada EElétrica (MJ/kg)	Saída EElétrica (MJ/kg)	Entrada ETérmica (MJ/kg)
(1) Mistura	0,105	---	---
(2) Fusão	0,052	---	9,291
(3) Produção das fibras	0,211	---	---
(4) Câmara compressora	0,316	---	---
(5) Cura	---	---	4,244
(6) Resfriamento	0,422	---	---
(7) Máquina de fibra de vidro	0,105	---	---
(8) Embalagem	0,105	---	---
(9) Compressor	0,918	---	---
(10) Caldeira	---	---	5,268
(11) Geração de energia	---	0,054	0,163

Fonte: Adaptado de *Brown, Hamel e Hedman* (1996)

MDF

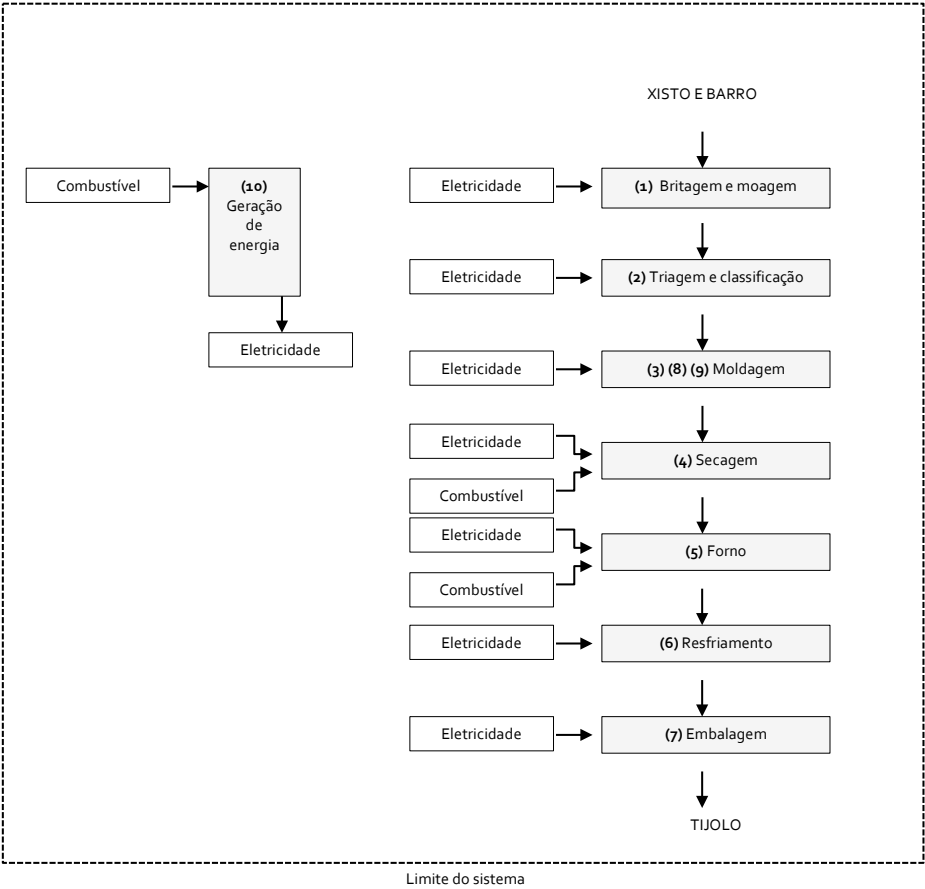


Limite do sistema

Etapa	Entrada	Saída	Entrada
	EElétrica (MJ/kg)	EElétrica (MJ/kg)	ETérmica (MJ/kg)
(1) Tratamento	0,168	---	---
(2) Refinamento	1,900	---	---
(3) Secagem	---	---	---
(4) Formação	2,000	---	---
(5) Prensa	1,055	---	---
(6) Estabilização / Secagem	---	---	1,04
(7) Finalização	0,475	---	---
(8) Caldeira	---	---	20,26
(10) Geração de energia	---	0,158	0,46

Fonte: Adaptado de *Brown, Hamel e Hedman* (1996)

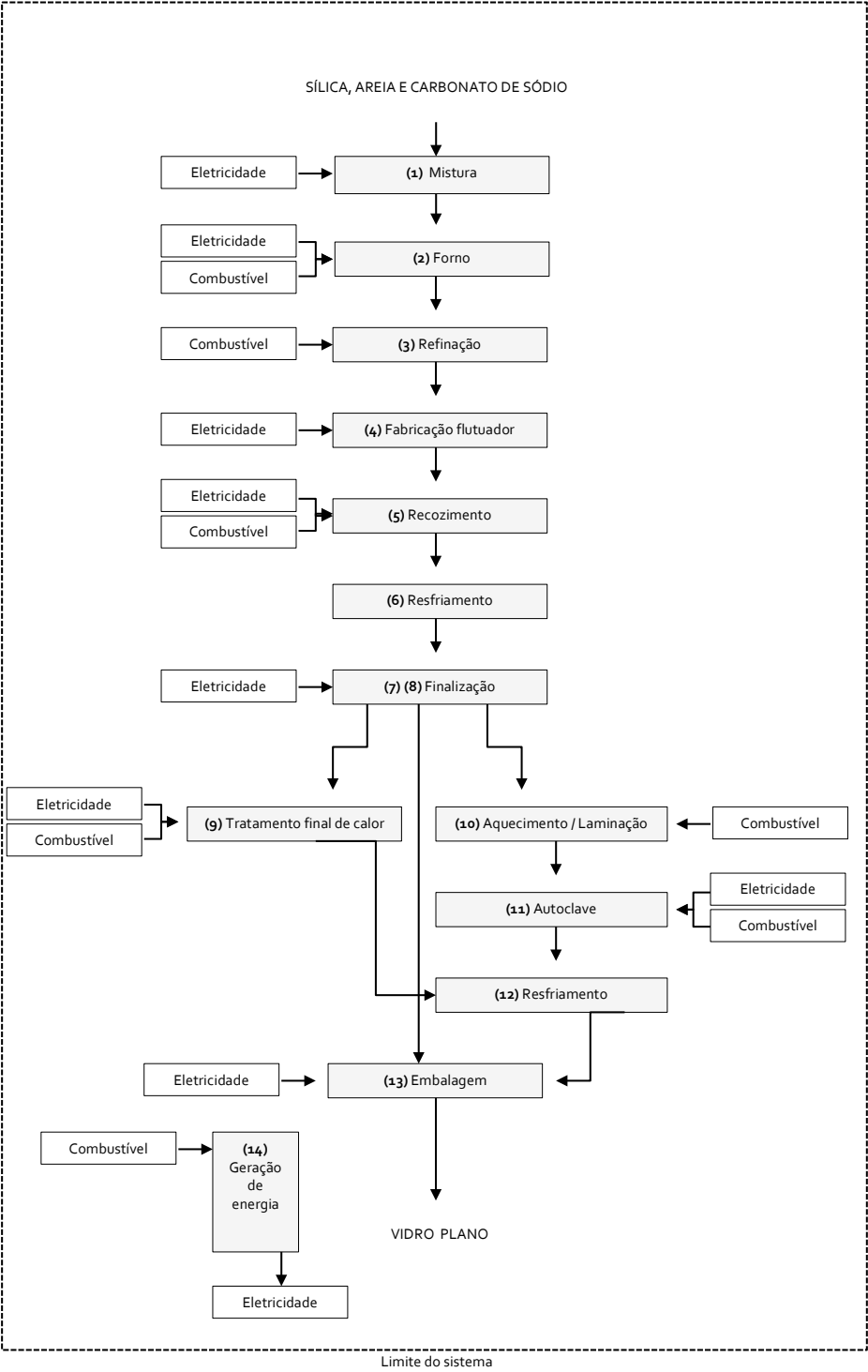
Tijolo



Etapa	Entrada EElétrica (MJ/kg)	Saída EElétrica (MJ/kg)	Entrada ETérmica (MJ/kg)
(1) Britagem e moagem	0,020	---	---
(2) Triagem e classificação	0,006	---	---
(3) Moldagem	0,128	---	---
(4) Secagem	0,004	---	0,06
(5) Forno	0,134	---	4,84
(6) Resfriamento	0,074	---	---
(7) Embalagem	0,004	---	---
(8) Moldagem em forma	0,128	---	---
(9) Moldagem com prensa	0,128	---	---
(10) Geração de energia	---	0,014	0,044

Fonte: Adaptado de *Brown, Hamel e Hedman* (1996)

Vidro



Etapa	Entrada EElétrica (MJ/kg)	Saída EElétrica (MJ/kg)	Entrada ETérmica (MJ/kg)
(1) Mistura	0,053	---	---
(2) Forno	0,168	---	9,291
(3) Refinação	---	---	0,390
(4) Fabricação flutuador	0,443	---	---
(5) Recozimento	0,013	---	0,422
(6) Resfriamento	---	---	---
(7) Finalização	0,006	---	---
(8) Esmagamento	0,006	---	---
(9) Tratamento final de calor	0,063	---	1,351
(10) Aquecimento	---	---	0,200
(11) Autoclave	0,023	---	0,095
(12) Resfriamento	---	---	---
(13) Embalagem	0,013	---	---
(14) Geração de Energia	---	0,017	0,054

Fonte: Adaptado de *Brown, Hamel e Hedman* (1996)